



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CONSTRUÇÃO CIVIL**

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS EM MATERIAIS  
GRANULARES E ARGAMASSAS COM CINZA PESADA E AGREGADO  
RECICLADO.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**GIOVANNA JANSEN DUAILIBE  
ORIENTADOR: PROF. DR. MALIK CHERIAF  
FLORIANÓPOLIS, MAIO DE 2008.**

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS EM MATERIAIS  
GRANULARES E ARGAMASSAS COM CINZA PESADA E AGREGADO  
RECICLADO.**

**GIOVANNA JANSEN DUAILIBE**

Dissertação julgada para a obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

Especialidade em ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final pelo  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

---

Prof. Dr. Glicério Trichês – Coordenador da PPGEC

---

Prof. Dr. Ing. Malik Cheriaf (UFSC) - Orientador

**Comissão examinadora:**

---

Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki (Examinador Externo)

---

Prof. Dr. João Cardoso Lima (Examinador Externo)

---

Prof. Dr. Luis Roberto Prudêncio Jr. (Examinador do PPGEC).

Aos meus pais, José e Daize Duailibe e aos  
meus irmãos, Giselly e Gilberto.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda luz, por sempre proteger o meu caminho, por sempre cuidar de mim.

Aos meus quatro tesouros, meus pais e meus irmãos, por todo apoio, amor e presença. Sem vocês, eu não estaria aqui. Muito obrigada.

Ao prof. Malik, pela orientação, disponibilidade e por toda paciência, principalmente nos momentos mais difíceis.

À prof. Janaíde, pela atenção e por estar sempre disponível a contribuir positivamente com este trabalho.

Aos queridos companheiros do laboratório Valores, os presentes e os que já se foram, pela amizade, companhia e auxílio com os ensaios, Carol, Elis, Jeff, Lígia, Cissa, Gus e Paulo. Em especial, agradeço a Niubis, pelo apoio emocional imprescindível, no começo dessa jornada, a Rubenito, por sempre me ajudar, mesmo quando seu próprio tempo era curto e a Léo, pela disposição constante em sempre sanar minhas dúvidas, quando solicitado, ao longo desta pesquisa e por compartilhar seus “achados bibliográficos”. Obrigada turma.

Ao IPT, pela doação de material usado na pesquisa.

Ao prof. Macarini e prof. Prudêncio pelo empréstimo de material de laboratório.

Às meninas da casa verde, em especial a Beth e a Ju, que foram meu refúgio aqui em Floripa e os primeiros laços de amizade que desenvolvi nessa cidade.

Aos parentes e amigos ludovicenses, por todo incentivo, apoio, carinho e amizade.

“Onde quer que você vá, vá com todo o coração.”

(Confúcio)

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE ABREVIACÕES .....</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>XVI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XVII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Justificativa.....	4
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo geral .....	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	5
1.3 Delimitações da pesquisa .....	5
1.4 Hipóteses de trabalho .....	5
1.4.1 Hipótese geral:.....	5
1.4.2 Hipóteses específicas:.....	5
1.5 Estrutura da dissertação .....	6
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>8</b>
2.1. Materiais porosos e índices físicos .....	8
2.1.1 Tipos de água nos materiais porosos .....	9
2.2 Mecanismos de fixação e transporte de umidade em materiais porosos .....	9
2.2.1 Fixação do vapor de água .....	10
2.2.2 Fixação e transporte da água .....	12
2.2.2.1 Absorção de água por capilaridade.....	12
2.2.2.2 Transporte em meio isotérmico não saturado.....	15
2.3 Propriedades físicas, elétricas e hidrodinâmicas .....	20
2.3.1 Superfície específica e granulometria dos grãos .....	21
2.3.2 Forma e textura superficial dos grãos.....	22
2.3.3 Massa específica aparente seca e Massa unitária seca .....	23
2.3.4 Porosidade.....	25
2.3.5 Resistência e condutividade elétrica.....	29
2.3.6 Absorção de água .....	37
2.3.7 Absorção capilar.....	39
2.3.8 Ângulo de molhamento aparente.....	45
2.3.9 Difusividade hídrica .....	46
2.3.10 Cinética de secagem ao ar .....	51
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>53</b>
3.1 Materiais utilizados.....	55
3.1.1 Cimento .....	55
3.1.2 Agregados miúdos .....	56
3.1.2.1 Areia normal .....	56
3.1.2.2 Cinza pesada.....	56
3.1.2.3 Agregado reciclado de resíduo de construção e demolição.....	56
3.1.3 Água .....	57
3.2 Métodos .....	57
3.2.1 Caracterização física dos agregados.....	57
3.2.1.1 Composição Granulométrica de acordo com a NBR NM 248:2001.....	57

3.2.1.2	Massa específica pelo processo do picnômetro.....	58
3.2.1.3	Massa unitária baseada na NBR7251/82.....	58
3.2.1.4	Procedimento de lavagem.....	59
3.2.2	Composição das misturas granulares.....	59
3.2.3	Caracterização hidrodinâmica .....	60
3.2.3.1	Absorção de água: condição saturado superfície seca.....	60
3.2.3.2	Absorção capilar .....	61
3.2.3.3	Perda de água por secagem ao ar.....	63
3.2.4	Produção das argamassas .....	64
3.2.5	Medição de propriedades no estado fresco.....	66
3.2.5.1	Massa específica aparente de acordo com a NBR 13278/05.....	66
3.2.6	Determinação de propriedades físicas, hidrodinâmicas e elétricas no estado endurecido. ....	67
3.2.6.1	Massa específica no estado endurecido.....	67
3.2.6.2	Porosidade aberta e absorção de água em concordância com a NBR 9778/05. ....	67
3.2.6.3	Absorção capilar de água.....	67
3.2.6.4	Ângulo de molhamento aparente.....	68
3.2.6.5	Resistência elétrica .....	68
3.2.6.6	Perfil de umidade.....	69
4.	RESULTADOS E ANÁLISES .....	71
4.1	Caracterização física dos agregados.....	71
4.2	Composição das misturas granulares – caracterização física. ....	75
4.3	Caracterização hidrodinâmica das misturas granulares.....	78
4.3.1.	Absorção de água dos grãos (Picnômetro e NBR NM 30)- Resultados.....	78
4.3.2.	Absorção capilar.....	81
4.3.3	Secagem ao ar.....	94
4.4	Propriedades das argamassas no estado fresco.....	100
4.4.1	Massa específica aparente (NBR 13278/05) - Resultados.....	100
4.5	Propriedades físicas das argamassas no estado endurecido.....	102
4.5.1	Massa específica aparente – Resultados.....	102
4.5.2	Porosidade aberta (NBR 9778/87)- Resultados e Análises .....	105
4.6	Propriedades hidrodinâmicas das argamassas no estado endurecido.....	108
4.6.1	Absorção capilar.....	108
4.6.2	Ângulo de molhamento aparente.....	115
4.7	Propriedades elétricas das argamassas no estado endurecido .....	116
4.7.1	Resistências elétricas – Resultados. ....	116
4.7.2	Perfis de resistência elétrica das argamassas.....	121
5.	CONCLUSÕES .....	133
6.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	136

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Material poroso e suas fases. ....	8
Figura 2: Fenômenos que ocorrem em um poro cilíndrico com o aumento da umidade relativa .....	11
<b>Figura 3: Isoterma de sorção típica de um material poroso.</b> .....	11
Figura 4: Situações de transporte de água por capilaridade .....	12
Figura 5: Ângulo de contato .....	13
Figura 6: Curva de sucção capilar .....	15
<b>Figura 7: Elemento de volume de um meio não saturado no qual ocorrem variações na</b> .....	18
Figura 8: Massas específicas aparentes e massas unitárias, onde: AGRI = com resíduo cerâmico AGRII com resíduo cimentício. ....	24
Figura 9: Medição da porosidade, saturação e densidade em poço de 800m de profundidade, na montanha Yucca, Nevada. ....	26
Figura 10: a) Dados das pastas. b) Dados das argamassas .....	30
Figura 11: Relação entre a permissividade dielétrica e conteúdo de umidade. ....	31
Figura 12: a) Amostra para medição da resistividade na direção vertical. b) Amostra para medição da resistividade na direção horizontal. ....	32
Figura 13: a) Resistividade medida no sentido vertical. b) Resistividade medida no sentido horizontal .....	32
Figura 14: a) Ensaio de dureza no sentido vertical. b) Ensaio de dureza no sentido horizontal. ....	33
Figura 15: Decréscimo da condutividade ao longo do tempo a 20°C. ....	34
Figura 16: Decréscimo de N ao longo do tempo. ....	34
Figura 17: Relação entre a condutividade do fluido dos poros e a temperatura. ....	35
Figura 18: Efeito do conteúdo da sílica- fume na condutividade relativa de pastas de cimento a diferentes idades, calculada com base nos dados de Page; Vennesland (1983) .....	36
Figura 19: Curvas características da calibração dos sensores. ....	37
Figura 20: Aparelho para medição de absorção .....	40
Figura 21: Influência do tratamento nas amostras na absorção capilar .....	42
Figura 22: Absorção de água por unidade de área versus a raiz do tempo. ....	44
Figura 23: Coeficiente de difusividade de umidade (Dw) de Tijolos. ....	46
Figura 24: Princípio do método de Boltzmann (à esquerda) e do método do perfil (à direita). ....	47
Figura 25: Padrões gerais típicos de umidade .....	50
Figura 26: Fluxo de secagem versus conteúdo de umidade de cenosferas. ....	51
Figura 27: Perda de massa por unidade de área versus raiz quadrada do tempo. ....	52
Figura 28: Esquema geral do programa experimental .....	53
Figura 29: Cinza Pesada. ....	56
Figura 30: Agregado reciclado. ....	57
Figura 31: Esquema de ensaio de absorção capilar em material granular .....	62
Figura 32: Altura dos orifícios no molde de pvc e vista lateral do molde com as hastes introduzidas. ....	65
Figura 33: Molde em PVC, com hastes pré-fixadas. ....	66
Figura 34: Aparato utilizado no ensaio de absorção capilar. ....	68
Figura 35: Esquema do sistema .....	69



Figura 36: Aparato utilizado para medição do perfil de umidade.....	70
Figura 37: Distribuição granulométrica da CzP e do AGR.....	72
Figura 38: Distribuição granulométrica das misturas.....	76
Figura 39: Massa específica aparente x Teor de substituição.....	76
Figura 40: Massa unitária seca x teor de substituição.....	77
Figura 41: Estrutura porosa das misturas 100CzP-SF e REF CzP-SF.....	79
Figura 42: Absorção dos grãos x massa unitária seca.....	81
Figura 43: Massa unitária seca x Teor de substituição.....	82
Figura 44: Saturação teórica máxima x Teor de substituição.....	83
Figura 45: Volume de água absorvido x tempo- CzP-SF.....	84
Figura 46: Velocidade de absorção das misturas com CzP-SF.....	84
Figura 47: Volume de água absorvido x tempo- AGR-SF.....	85
Figura 48: Velocidade de absorção das misturas com AGR-SF.....	86
Figura 49: Volume de água absorvido x tempo- CzP-SF e AGR-SF.....	87
Figura 50: Velocidade de absorção das misturas entre CzP-SF e AGR-SF.....	88
Figura 51: Grau de saturação x Teor de substituição.....	90
Figura 52: Sorptividade x teor de substituições.....	91
Figura 53: Volume de água pela secção da amostra x raiz do tempo- Misturas com CzP-SF.....	91
Figura 54: Volume de água pela secção da amostra x raiz do tempo- Misturas com AGR-SF.....	92
Figura 55: Volume de água pela secção da amostra x raiz do tempo- Misturas com CzP-SF e AGR-SF.....	92
Figura 56: Volume de água x Massa unitária.....	94
Figura 57: Grau de saturação x tempo-misturas com CzP-SF.....	95
Figura 58: Grau de saturação 74% x tempo- misturas com CzP-SF.....	96
Figura 59: Grau de saturação x tempo- misturas com AGR-SF.....	97
Figura 60: Grau de saturação 27% x tempo- misturas com AGR-SF.....	97
Figura 61: Grau de saturação x tempo- misturas entre CzP-SF e AGR-SF.....	98
Figura 62: Grau de saturação 46% x tempo- misturas entre a CzP-SF e AGR-SF.....	99
Figura 63: Secagem das argamassas com CzP-SF.....	100
Figura 64: Massa específica aparente no estado fresco x teor de substituição.....	101
Figura 65: Massa específica no estado fresco ( $\text{g/cm}^3$ ) x Absorção de água dos grãos(%). .....	102
Figura 66: Massa específica aparente seca x teor de substituição.....	103
Figura 67: Massa específica aparente seca x Absorção dos grãos.....	104
Figura 68: Massa específica no estado endurecido x Massa unitária material granular.....	105
Figura 69: Porosidade aberta das argamassas x Teor de substituição.....	106
Figura 70: Porosidade das argamassas x Massa específica aparente seca das argamassas.....	106
Figura 71: Porosidade x Massa unitária material granular ( $\text{g/cm}^3$ ).....	107
Figura 72: Porosidade x Absorção dos grãos.....	108
Figura 73: Absorção de água x tempo – Misturas com CzP-SF.....	109
Figura 74: Absorção de água x tempo – Misturas com AGR-SF.....	109
Figura 75: Absorção de água x tempo – Misturas entre a CzP-SF e o AGR-SF.....	110
Figura 76: Sorptividades das argamassas x Teor de Substituição.....	111
Figura 77: Volume de líquido absorvido por área da seção transversal em função da raiz do tempo de argamassas com CzP-SF– Determinação da sorptividade.....	112
Figura 78: Volume de líquido absorvido por área da seção transversal em função da raiz do tempo de argamassas com AGR-SF– Determinação da sorptividade.....	112

Figura 79: Volume de líquido absorvido por área da seção transversal em função da raiz do tempo de argamassas com CzP-SF e AGR-SF– Determinação da sorptividade.	113
Figura 80: Sorptividade das argamassas x Porosidade das argamassas.	113
Figura 81: Sorptividade das argamassas x Sorptividade das misturas granulares.	114
Figura 82: Estoque de líquido infiltrado x raiz do tempo.	115
Figura 83: Ângulo de molhamento aparente x teor de substituição (%)	116
Figura 84: Resistência elétrica x teor de substituição.	117
Figura 85: Resistência elétrica x teor de umidade – Misturas com CzP-SF.	118
Figura 86: Resistência elétrica x teor de umidade – Misturas com AGR-SF.	119
Figura 87: Resistência elétrica x teor de umidade – misturas entre CzP-SF e AGR-SF.	120
Figura 88: Perfil de resistência na condição seca. 50CzP-SF.	122
Figura 89: Perfil de resistência na condição seca. 100AGR-SF.	122
Figura 90: Estrutura da argamassa.	123
Figura 91: Perfil de resistência elétrica- 100CzP-SF.	124
Figura 92: Perfil de resistência da mistura com 50% de CzP-SF	124
Figura 93: Perfil de resistência da mistura 100ref CzP-SF	125
Figura 94: Perfil de resistência da mistura com 100% AGR-SF	126
Figura 95: Perfil de resistência da mistura com 50% de AGR-SF	126
Figura 96: Perfil de resistência da mistura Referência do AGR-SF	127
Figura 97: Perfil de resistência da mistura com 50% de CzP-SF e 50% de AGR-SF...	128
Figura 98: Perfil de umidade da mistura com 100% CzP-SF.	129
Figura 99: Perfil da variação de umidade da mistura com 100% CzP-SF.	129
Figura 100: Perfil de umidade da mistura com 50% de CzP-SF e 50% de AGR-SF....	130
Figura 101: Perfil da variação de umidade da mistura com 50% de CzP-SF e 50% de AGR-SF	130
Figura 102: Perfil de umidade da mistura com 100% AGR-SF	131
Figura 103: Perfil da variação de umidade da mistura com 100% de CzP-SF.	131

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Massas específicas no estado endurecido .....	25
Tabela 2: Misturas das argamassas.....	33
Tabela 3: Características físicas dos agregados.....	39
Tabela 4: Composições de areia natural e cinza pesada.....	44
Tabela 5: Propriedades da água e do álcool a 20°C.....	45
Tabela 6: Especificação técnica do cimento CP-I-S 32.....	55
Tabela 7: Faixas granulométricas do ensaio de massa específica .....	58
Tabela 8: Composições granulométricas.....	60
Tabela 9: Misturas .....	64
Tabela 10: Quantitativo de amostras .....	66
Tabela 11: Caracterização física dos agregados de substituição .....	71
Tabela 12: Absorção de água- agregados e referências.....	78
Tabela 13: Massas específicas no estado fresco.....	101
Tabela 14: Variação de massa específica entre as misturas .....	103
Tabela 15: Estoques de líquido infiltrado e ângulo de molhamento aparente.....	115
Tabela 16: Umidade das sondas. ....	117
Tabela 17: Saturação das argamassas aos teores de umidade definidos-CzP.....	119
Tabela 18: Saturação das argamassas aos teores de umidade definidos- AGR.....	119
Tabela 19: Saturação das argamassas aos teores de umidade definidos- CzP AGR .....	120

## LISTA DE ABREVIACÕES

AGR	Agregado reciclado de resíduo de construção e demolição
AGR-SF	Agregado reciclado de resíduo de construção e demolição sem finos
CP I – 32	Cimento Portland comum- 32MPa (resistência a 28 dias)
CP II F-32	Cimento Portland composto com filler- 32MPa (resistência a 28 dias)
CP V ARI-32	Cimento Portland de alta resistência inicial- 32MPa (resistência a 28 dias)
CzP	Cinza pesada
CzP-SF	Cinza pesada sem finos
GGBS	Ground granulated blast- furnace slag (Éscória de alto forno)
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MK	Metacaulin
MS	Sílica ativa
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PVC	Poli cloreto de vinila
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
UR	Umidade Relativa
VALORES	Valorização de Resíduos na Construção Civil.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$  = Ângulo de contato;  
 $\beta$  = Parâmetro da estrutura do poro;  
 $\delta$  = Massa unitária;  
 $\varepsilon$  = Permissividade dielétrica do material;  
 $\varepsilon_w$  = Permissividade dielétrica da fase líquida do material ( em temperatura ambiente = 79,4);  
 $\mu$  = Viscosidade dinâmica do fluido ( $\text{Pa.s} = \text{kg. m}^2 .\text{s}^{-1}$ );  
 $\mu_l$  = viscosidade dinâmica da água ( $\text{Pa.s} = \text{kg. m}^2 .\text{s}^{-1}$ )  $\approx 0.001 \text{Pa.s}$ ;  
 $\mu_a$  = Viscosidade dinâmica do álcool ;  
 $\theta_v$  = Volume total;  
 $\theta$  = Conteúdo de umidade;  
 $\theta_f$  = Conteúdo de umidade final (saturado);  
 $\theta_a$  = Conteúdo de umidade, devido ao ganho de água, num instante t;  
 $\theta_i$  = Conteúdo de umidade inicial;  
 $\rho$  = Massa específica do líquido;  
 $\rho_f$  = Massa específica de fluido;  
 $\rho_a$  = Massa específica da água;  
 $\rho_m$  = Massa específica aparente do material;  
 $\rho_w$  = Massa específica;  
 $\sigma$  = Tensão superficial;  
 $\sigma_{lg}$  = Tensão superficial entre o líquido e o gás;  
 $\sigma_{sl}$  = Tensão superficial entre o sólido e o líquido;  
 $\sigma_{lg}$  = Tensão superficial entre o sólido e o gás;  
 $\sigma_l$  = Tensão superficial água- ar;  
 $\sigma_a$  = Tensão superficial álcool- ar;  
 $\tau$  = Tortuosidade (aparente, considerando-se a porosidade aberta como porosidade total);  
 $\tau_r$  = Tortuosidade real;  
 $\psi$  = Potencial de sucção (m.c.a);  
 $\Phi$  = Porosidade;  
 $\Phi_{cap}$  = Porosidade capilar;  
 $\Delta P$  = Diferença de pressão da água ( $\text{Pa} = \text{N/m}^2 = \text{Kg.m}^{-1} .\text{s}^{-2}$ );  
 $\partial t$  = instante t;  
 $\partial x$  = profundidade x no instante t;  
 $A$  = Área de secção;  
 $A$  = pré- exponencial constante;  
 $A_b$  = absorção;  
 $a$  = constante empírica de proporcionalidade;  
 $a$  = Parâmetro que depende da mineralogia e da densidade dos grãos do material;  
 $\alpha_e$  = ângulo de molhamento aparente;  
 $C = V/A_o + \rho A$ ;  
 $C_m$  = Constante obtida experimentalmente;  
 $c$  = velocidade da luz ( $3 \times 10^8 \text{m/s}$ );  
 $CC$  = Coeficiente de curvatura;  
 $D(\theta)$  = Difusividade hídrica devido ao gradiente de umidade ( $\text{m/s}^2$ );  
 $D_{10}$  = Diâmetro da peneira onde 10% do material fica retido;  
 $D_{30}$  = Diâmetro da peneira onde 30% do material fica retido;  
 $D_{60}$  = Diâmetro da peneira onde 60% do material fica retido;

$dh/ds$  = gradiente de potencial hidráulico;  
 $d$  = Diâmetro do poro;  
 $E_a$  = Energia de ativação para o processo de condução;  
 $F$  = Fator de formação da resistividade =  $F_R/F_F$ ;  
 $F_R$  = Resistividade elétrica do material totalmente saturado;  
 $F_F$  = Resistividade do fluido;  
 $g$  = Aceleração da gravidade;  
 $h$  = energia da água por unidade de peso (ou potencial hidráulico) (m);  
 $i$  = volume absorvido por área de secção do corpo-de-prova;  
 $L_e$  = Comprimento do caminho efetivo médio dos poros;  
 $L$  = Distância mais curta no caminho dos poros;  
 $L$  = Comprimento da amostra;  
 $L_i$  = diâmetro da franja de infiltração;  
 $K$  = permeabilidade de Darcy ( $m/s^2$ );  
 $k$  = Permeabilidade intrínseca (que depende somente do meio poroso) ( $m/s^2$ );  
 $K$  - condutividade hidráulica em m/s (meio não saturado);  
 $K_x$  = condutividade hidráulica em x;  
 $K$  = coeficiente de capilaridade;  
 $M(t)$  = Ganho de massa da amostra em um instante t;  
 $m$  = Massa seca;  
 $m_{ss}$  = massa da amostra na condição saturado superfície seca;  
 $m_h$  = massa úmida;  
 $m_a$  = massa do picnômetro meio cheio;  
 $m_c$  = massa do picnômetro meio cheio com amostra;  
 $m$  = Índice de cimentação;  
 $n$  = Expoente de saturação;  
 $P_{ag}$  = massa do picnômetro com água;  
 $P_{ag+g}$  = massa do picnômetro com água mais amostra;  
 $P_c$  = Pressão capilar;  
 $p + \rho g = h$  = energia hidráulica;  
 $P_{Hg}$  = Pressão do mercúrio;  
 $Q$  = Taxa de fluxo volumétrico ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  
 $q$  = densidade de fluxo;  
 $q_x$  = densidade do fluxo em x;  
 $R$  = Constante do Gás ( $8.314 \text{ J/K mol}$ );  
 $r$  = Raio do poro;  
 $r_0$  = raio do tubo em m;  
 $r_1$  e  $r_2$  = Raio do poro;  
 $S_w$  = Grau de saturação do meio;  
 $S$  = Saturação teórica;  
 $S$  = Sorptividade;  
 $S_g$  = sucção dos poros menores, o efeito da difusão da umidade;  
 $Se$  = Inclinação da reta (gráfico de absorção a água);  
 $Sa$  = Inclinação da reta (gráfico de absorção a álcool);  
 $s$  = coordenada qualquer de posição x, y ou z (m);  
 $T$  = Temperatura;  
 $t$  = Tempo;  
 $t_p$  = Tempo de viagem de um pulso elétrico;  
 $U$  = Coeficiente de Uniformidade;  
 $V$  = Volume;

$V_a$  = volume de água absorvido;

$V/A_o$  = volume de água absorvido pela área de secção transversal, devido à absorção inicial;

$V_s$  = Volume sólido;

$V_l$  = Volume líquido;

$V_g$  = Volume gás;

$x$  = Correlação constante, varia de 0,5 a 1,5. Na prática é geralmente igual a 2;

$z$  = energia potencial gravitacional e  $(p/\rho g)$  a energia potencial de pressão;

$Z$  = altura da mancha;

## RESUMO

As propriedades de transporte de umidade de um material estão relacionadas à sua durabilidade, visto que a deterioração deste é causada pela penetração de agentes agressivos, através da água. É importante que as propriedades hidrodinâmicas de materiais fabricados com resíduos sejam mensuradas para uma avaliação mais completa de seu desempenho e para servirem como dados de entrada em modelos de predição de comportamento. A presente pesquisa utilizou agregado reciclado de construção e demolição (AGR) e cinza pesada (CzP), ambos sem finos, em materiais granulares e argamassas e avaliou suas propriedades de fixação e transporte de água, tendo como referência materiais granulares e argamassas confeccionadas com areia IPT, de mesma granulometria dos resíduos. As porcentagens de substituição (em volume) foram de 25, 50, 75 e 100%. Foi também composta uma mistura entre os dois resíduos utilizados com teor de substituição de 25%, 50% e 75%. Foram avaliadas, nos materiais granulares: absorção capilar, secagem ao ar e absorção saturada superfície seca. Nas argamassas foram avaliadas: absorção por capilaridade e imersão, ângulo de molhamento aparente e resistência elétrica ao longo da absorção capilar. Os resultados mostram a influência dos resíduos na fixação e transporte de umidade nos materiais granulares e nas argamassas.

Palavras-chaves: argamassa, Cinza Pesada, Agregado reciclado, absorção capilar.



## ABSTRACT

The properties of transport of moisture of a material are related to its durability, because the damage is caused by the aggressive penetration of agents through the water. It is important that the hydrodynamic properties of materials made with waste are measured for a more complete evaluation of their performance and to serve as data entry into models for prediction of behaviour. This research used recycled aggregate of construction and demolition (AGR) and bottom ash (CzP), both without fines, in granular materials and mortars and assessed the properties of fix and transport of water, taking as reference granular materials and mortar made with sand IPT, with the same size of waste. The percentages of replacement (by volume) were 25, 50, 75 and 100%. It also comprises a mixture between the two used wastes for replacement of 25, 50 and 75%. Were evaluated in granular materials: absorption by capillarity, drying the air and absorption saturated dry surface. In the mortars were evaluated: absorption by capillarity and immersion, wetting apparent angle, and electrical resistance along the absorption by capillarity. The results show the influence of waste in fix and transport of moisture in granular materials and mortars.

Keywords: mortar, bottom ash, recycled aggregate, absorption by capillarity.

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de resíduos na fabricação de materiais de construção civil cresce com o avanço de pesquisas, com resultados cada vez mais efetivos. Muitos resíduos vêm sendo considerados técnico e financeiramente aptos a substituírem ou a serem usados com os materiais tradicionais.

Entre esses resíduos estão a cinza pesada, oriunda da queima de carvão mineral e o agregado reciclado de RCD (resíduo de construção e demolição).

Os materiais de construção, bem como a cinza pesada e o agregado reciclado de RCD, precisam ser avaliados de modo que seu comportamento ao longo do tempo e sua interação com o meio ambiente sejam conhecidos. Estes materiais devem, ainda, atender a normas e padrões de desempenho estabelecidos.

No Brasil, a NBR 13281, por exemplo, determina os requisitos para argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos. Entretanto, mais que seguir uma norma estabelecida, é preciso comparar o produto a padrões de fato satisfatórios.

As avaliações de desempenho atuam como ferramenta na busca pela melhora qualitativa dos produtos utilizados em uma edificação e dos seus atributos.

O desempenho da edificação deve ser considerado de modo hierárquico, partindo de produtos e componentes até todo o edifício. Para definir corretamente o contexto do desempenho é necessário identificar os agentes que atuam nos edifícios <sup>1</sup> e os parâmetros<sup>2</sup> do próprio desempenho, que quando definidos, devem atender às normas e/ou padrões estabelecidos (FOLIENSTE; LEICESTER; PHAM, 1998).

Entre os produtos do edifício e os atributos necessários a cada uma de suas partes, convém citar a parte revestimento e os atributos de habitabilidade (onde está inserido o controle de umidade) e sustentabilidade (onde a durabilidade e o comprometimento ambiental são citados).

No quesito durabilidade, a metodologia geral de análise consiste em: identificar os mecanismos de degradação e envelhecimento, classificar a agressividade do meio

---

<sup>1</sup> Os agentes podem ser naturais ou não, como os biológicos, climáticos, humanos, de atividade, e são considerados como cargas e o desempenho é medido de encontro a ação destes.

<sup>2</sup> Os parâmetros são definidos como propriedades do edifício, que refletem ou caracterizam seu atributo (características ou necessidades solicitadas pelo usuário) ou um aspecto de seu desempenho. Quando possível, devem ser quantificados para que depois possam ser calculados ou medidos.

ambiente, classificar o material, relacionar a agressividade e a durabilidade do material e prever a vida útil.

Os problemas de durabilidade são causados pela penetração de agentes agressivos, que deterioram o material, através da água. Pela estrutura de poros, penetram, difundem-se, ou percolam os agentes agressivos do meio ambiente.

Analisar o comportamento dos materiais porosos, na presença da água na forma líquida e vapor, é muito importante para o estudo da suscetibilidade dos materiais à penetração dos agentes agressivos.

Nessa análise, instrumentos de simulação do comportamento hidrodinâmico do material em função das condições climáticas às quais ele está sujeito, podem ser utilizados. Sua importância se deve ao fato de que os materiais, além de conterem uma proporção de água livre muito variada, interagem com a umidade relativa do ar (CRAUSSE; LAURENT; PERRIN, 1996).

O uso de modelos de estudo de fluxo de água em meio não saturado está condicionado à determinação de propriedades hídricas e térmicas dos materiais dos quais se deseja simular o comportamento. Essas propriedades são usadas como dados de entrada para os modelos. Entre elas cita-se o conteúdo de umidade, o ciclo de adsorção e dessorção, ciclo de sucção capilar, permeabilidade ao vapor e a água, difusividade hídrica, condutividade hidráulica e condutividade térmica.

Laurent (1993) estudou a transferência de água em pedras (Rouffach e Rorschach), considerando suas morfologias internas e as condições externas hídricas e térmicas. O autor comprovou que a água existente nas pedras não era somente em forma de vapor. A presença de água na forma líquida expôs a necessidade de acoplar seu modelo de transferências a um modelo físico-químico de dissolução/precipitação para tratar realmente do problema da durabilidade.

Laurent *et al* (1999) acompanharam durante vários meses o comportamento de um muro. As propriedades térmicas e hídricas<sup>3</sup> de uma secção deste muro foram determinadas e ciclos de molhagem e secagem de amostras extraídas do mesmo foram simulados em laboratório. Depois modelaram e simularam numericamente a experiência e o comportamento hidrotérmico do muro.

---

<sup>3</sup> Foi considerado dois tipos de características hídricas: aptidão para fixar e reter a água e as propriedades que tangem o transporte da mesma. No primeiro tipo para a água em vapor, a adsorção e dessorção e para a água líquida, a sucção capilar. No segundo tipo, a permeabilidade para um meio saturado e a condutividade hidráulica para um meio insaturado. Além dessas foi medida a condutividade térmica.

Laurent *et al* (1999) também citam a necessidade de acompanhar o fluxo da água dentro dos materiais e a importância do uso de métodos indiretos que detectam com grande sensibilidade seus eventuais movimentos, como a aplicação de tensão elétrica no material. Se a água circula na rede porosa, a intensidade da corrente que circula dentro do material é alterada.

O estudo do comportamento hidrodinâmico de materiais porosos fabricados com resíduos é muito importante para que seu desempenho no quesito durabilidade seja avaliado. A determinação de suas propriedades é fundamental para uma correta avaliação, pois possibilita conhecer estes materiais, o que contribui para sua aceitação no mercado e facilita o avanço de pesquisas que buscam seu aperfeiçoamento.

Para tal, também é importante entender as alterações nos fluxos hídricos desses materiais. Materiais mais porosos, como a cinza pesada, absorvem mais água da mistura do que agregados convencionais, quando usados em misturas cimentícias. Essa água absorvida pode estar disponível posteriormente para hidratação, alterando a estrutura porosa do material.

Da mesma forma, de acordo com Neville (1997), devido à alta absorção dos grãos mais porosos, a água disponível para a mistura diminui, influenciando na formação de poros capilares e afetando a resistência nas primeiras idades.

A forma dos materiais também pode alterar seu comportamento hidrodinâmico e por consequência, sua durabilidade. Materiais com grãos mais angulares e lamelares tendem a formar poros mais tortuosos que dificultam a passagem da água no meio e diminuem sua permeabilidade.

Assim sendo, esta pesquisa se propõe a avaliar propriedades hidrodinâmicas da água em materiais granulares e argamassas com cinza pesada e agregado reciclado, com vistas a avançar nos estudos de desempenho desses materiais.

Neste trabalho foram medidas e avaliadas propriedades que possam vir a ser usadas como dados de entrada em modelos de transporte de água em meio não saturado e para inferir outras propriedades. Foram medidas a massa específica, massa unitária, absorção de água do grão, sorptividade e secagem ao ar do material granular e a porosidade, massa específica, sorptividade, ângulo de molhamento e resistência elétrica das argamassas.

## **1.1 Justificativa**

Para Foliente, Leicester, Pham (1998), avaliar o desempenho de uma edificação, bem como dos seus elementos e componentes baseia-se em requisitos e critérios, que exprimem as exigências do usuário e em métodos de avaliação que verificam o atendimento destas exigências. Entre as exigências do usuário, está a durabilidade.

Considerando que a durabilidade é um atributo necessário nas avaliações de desempenho e que o transporte de água nos materiais pode criar deficiências de durabilidade, esta pesquisa se justifica na necessidade de melhor compreender como os fluxos hídricos dos materiais são alterados com o uso de resíduos como a cinza pesada e o agregado reciclado e compreender os mecanismos de transporte de umidade e sua influencia na durabilidade dos materiais fabricados.

Inserido na área de materiais construtivos, da engenharia civil, o tema proposto se direciona para o desempenho de materiais e vincula-se a outras áreas específicas como a sustentabilidade e a gestão de resíduos.

A razão preponderante da escolha deste tema foi a necessidade de adequar o uso de argamassas fabricadas com cinza pesada e agregado reciclado aos padrões de desempenho requeridos. Para tanto, é necessário entender como os mecanismos de transporte de umidade podem influenciar sua durabilidade, visto que a durabilidade dos materiais está diretamente relacionada com a presença de agentes agressivos transportados pela água.

Espera-se, ao fim deste, disponibilizar à sociedade e ao meio acadêmico informações e avaliações esclarecedoras acerca do comportamento desses materiais inovadores da construção civil.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Determinar propriedades de transporte de umidade em materiais granulares e argamassas que utilizam a cinza pesada (CzP), obtida na queima de carvão, e o agregado reciclado dos resíduos de construção e demolição (AGR), em substituição ao agregado natural.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar, do ponto de vista hidrodinâmico, os materiais utilizados com base na sua estrutura porosa;
- Analisar propriedades de transporte de água dos materiais granulares com CzP e AGR;
- Avaliar a influência do uso da CzP e do AGR no desempenho hidrodinâmico das argamassas;
- Medir o perfil de umidade de argamassas com CzP e AGR a partir de medições elétricas.

### **1.3 Delimitações da pesquisa**

Esta pesquisa se limita aos materiais avaliados e às características dos seus lotes utilizados. A cinza pesada, segundo Rocha *et al.* (1999) apresenta variação em suas propriedades conforme composição, grau de moagem e beneficiamento do carvão. A variação nas propriedades do AGR é devida à origem diversificada desse resíduo. Além disto, o tipo de equipamento utilizado no beneficiamento do AGR influencia a forma e o tamanho de seus grãos.

### **1.4 Hipóteses de trabalho**

#### **1.4.1 Hipótese geral:**

A substituição da areia normal do IPT por CzP e AGR altera as propriedades hidrodinâmicas dos materiais granulares e das argamassas produzidas.

#### **1.4.2 Hipóteses específicas:**

- A substituição da areia IPT pelos resíduos, CzP e AGR, quando feita em volume, com correção granulométrica e igualdade no tamanho dos grãos, resulta em uma composição granular com a mesma estrutura porosa da areia IPT, desconsiderando-se a variação de forma dos grãos entre os materiais;
- A quantidade de água absorvida e a sorptividade das misturas granulares e das argamassas aumenta com o aumento do teor de CzP e AGR;

- A resistência elétrica das argamassas diminui com o aumento do seu teor de umidade.

Algumas hipóteses aceitas em modelos teóricos, utilizados neste trabalho, foram consideradas.

Na teoria do tubo capilar, os poros de um material poroso são considerados retos, e com o mesmo raio ao longo de toda a extensão do poro.

Na equação de escoamento em meio não saturado considerou-se que:

- O escoamento é isotérmico;
- A fase líquida é constituída por água;
- A fase sólida não é dissolvida na água;
- Não há reações químicas entre a água e a fase sólida;
- A variação do teor de água não implica na variação de volume do material;
- O meio é isótropo;
- O ar está submetido à pressão atmosférica;
- O escoamento é unidimensional;
- A lei de Darcy é válida.

### **1.5 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação é composta pelos capítulos Introdução, Revisão Bibliográfica, Materiais e métodos, Análise dos Resultados, Conclusão e Referências.

Na Introdução, capítulo 1, o tema da pesquisa e a sua justificativa são apresentados, seguidos pelos objetivos gerais e específicos do trabalho. As limitações da pesquisa, a hipótese geral e as hipóteses específicas também são apresentadas neste capítulo, que é finalizado com a estrutura do documento;

No capítulo 2, Revisão Bibliográfica, o material poroso é apresentado, seguido dos mecanismos de fixação e transporte de umidade, onde a fixação do vapor e da água, o fenômeno de absorção por capilaridade e o transporte de água em meio insaturado, sob condições isotérmicas, são explicados. A lei de darcy, a condutividade hidráulica, a equação da continuidade, a equação de escoamento em meio não saturado, a difusividade hídrica e a solução numérica para resolução da equação diferencial de

escoamento, em meio não saturado, são abordadas. Finalizando o capítulo da Revisão, as propriedades físicas e hidrodinâmicas do material são apresentadas;

No capítulo 3, Materiais e Métodos, o programa experimental da pesquisa é explicado;

O capítulo 4, Análise dos Resultados, traz os resultados obtidos nos ensaios e a análise destes resultados;

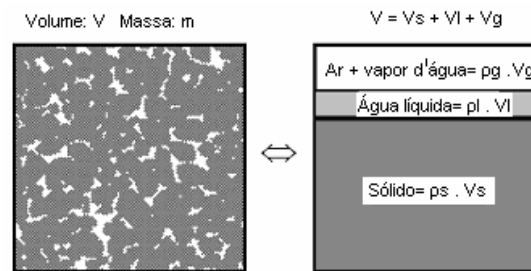
Por fim, o capítulo 5 trata das Conclusões da pesquisa, com sugestões para trabalhos futuros e o capítulo 6 lista as Referências Bibliográficas utilizadas.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Materiais porosos e índices físicos

Materiais porosos, como a argamassa, são constituídos de fases sólida, líquida e gasosa cada uma com volumes e massas (figura 1).



**Figura 1: Material poroso e suas fases.**  
Fonte: Daian; Laurent (1996).

Segundo Daian; Laurent (1996), para delinear um meio poroso é preciso delinear cada fase e suas proporções relativas, pois seu comportamento dependerá de tais proporções. Para tanto são definidos alguns índices físicos que afetam consideravelmente suas características:

#### a) Teor de umidade

O teor de umidade corresponde à quantidade de água presente no material. É definido como a razão entre a massa da água contida e a massa da parte sólida seca no volume da amostra.

O teor de umidade volumétrico corresponde à razão entre o volume de água contido e o volume da parte sólida seca da amostra.

#### b) Massa específica

A massa específica aparente corresponde à massa específica do material quando seco. É a relação entre a massa sólida seca e o volume total de uma dada amostra.

#### c) Índice de vazios

É a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos da amostra.

#### d) Porosidade

Corresponde ao máximo de fluido cabível em um meio poroso, e é dada pela razão entre o volume de vazios (volume de poros) e o volume total da amostra.

#### e) Grau de saturação

É a saturação efetiva do material em relação à sua saturação teórica calculada, em porcentagem.

A determinação desses índices físicos é feita de forma direta ou a partir de outros índices. Eles são mais detalhados na seção 2.3 desse capítulo, onde são apresentadas e discutidas propriedades dos materiais que se relacionam com a transferência de umidade e métodos de determinação dessas propriedades.

### 2.1.1 Tipos de água nos materiais porosos

A água pode estar presente no material poroso na forma líquida ou vapor. Para Metha e Monteiro (1994), a água presente no material poroso, na forma líquida, pode ser classificada em:

- Água livre. Encontrada em vazios capilares de grandes de diâmetros  $> 50\text{nm}$  ( $0.05\ \mu\text{m}$ ), é uma água livre da influência das forças de atração causadas pela superfície sólida e é regida pelas leis da hidráulica;
- Água capilar. Água retida por tensão capilar em capilares pequenos com diâmetros de 5 a  $50\text{nm}$ . Também conhecida como água absorvida, sobe acima da superfície livre da água pelos capilares;
- Água adsorvida. Película de água próxima à superfície do sólido que sob a ação de forças de atração, estão aderidas fisicamente à mesma;
- Água interlamelar ou água de gel. Água associada à estrutura do CSH;
- Água quimicamente combinada. Faz parte da estrutura molecular da parte sólida.

Desta forma, o tipo de água contida no material poroso e seu mecanismo de transporte estão diretamente relacionados com o tamanho dos poros.

### 2.2 Mecanismos de fixação e transporte de umidade em materiais porosos

Aqui são apresentados os principais mecanismos de fixação e transporte da água nos materiais porosos, quando expostos à umidade na forma líquida e/ou vapor.

Para De Freitas; Abrantes; Crausse (1996), a adsorção, a condensação e a capilaridade são os principais mecanismos de retenção da água.

O vapor de água se fixa pelo mecanismo de adsorção física e a água, na forma líquida, se fixa por absorção capilar.

O principal mecanismo de transporte de umidade na fase vapor é a difusão. O vapor de água também pode ser transportado por evaporação. Para Quenard; Sallee (1992) Apud Sato (1998) ocorre, ainda, transporte de vapor por convecção, mas esta é praticamente desprezível. A convecção ocorre quando há gradiente de temperatura.

Os mecanismos de transporte da água na forma líquida são: a absorção por capilaridade, a gravidade e os movimentos resultantes de gradientes de pressão.

Portanto, o mecanismo de transporte da água fixada dependerá do seu estado (vapor ou líquido), do conteúdo de umidade e ainda, se em um meio insaturado ou previamente saturado. O transporte da água nas fases líquida e vapor pode, ainda, ocorrer simultaneamente.

### **2.2.1 Fixação do vapor de água**

A umidade presente no ambiente externo, como vapor, se fixa na superfície do material poroso por adsorção física (mecanismo regido pelas forças de Van der Waals) e é transportado para o interior, principalmente, por difusão e evaporação.

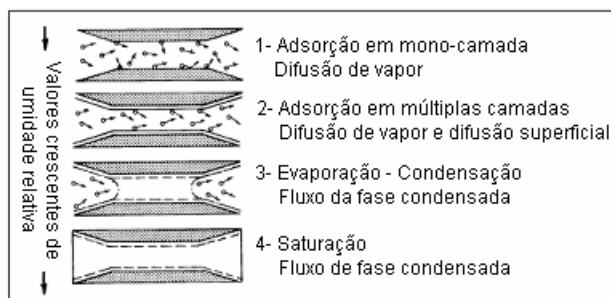
A figura 2 mostra o vapor de água se fixando e sendo transportado em um poro. Segundo Sato (1998) tem-se:

Fase 1 – Onde há adsorção em monocamada, por difusão;

Fase 2 – A difusão do vapor e escoamento do líquido, devido a diferenças de pressões na camada superficial adsorvida (até a umidade relativa continuar menor que o valor de umidade que provoca a condensação);

Fase 3 - A umidade atinge o valor para condensação, preenche o poro, mas não forma uma fase contínua com outros poros e sim uma “ilha” de água que, em contato com fases gasosas nas extremidades, sofre condensação na extremidade anterior do poro e evapora na extremidade posterior;

Fase 4 - Transporte predominante na forma líquida (a continuidade da massa se estabeleceu).

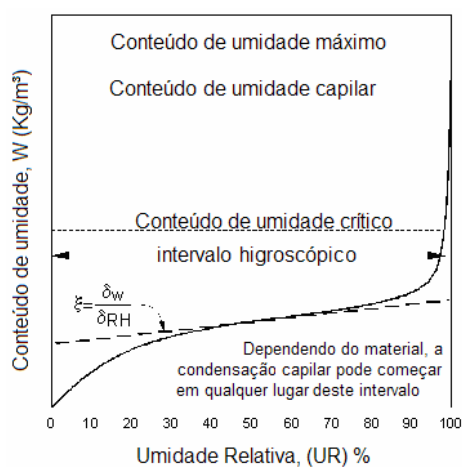


**Figura 2: Fenômenos que ocorrem em um poro cilíndrico com o aumento da umidade relativa**

Fonte: Sato, N. M. N. (1998)

Há condensação até o equilíbrio termodinâmico entre o meio gasoso e a camada adsorvida. O teor de umidade do material neste estado chama-se teor de umidade de equilíbrio (VALEN, 1998).

A relação entre a umidade relativa do ar e o conteúdo de umidade de equilíbrio é dado pela curva de isoterma de sorção (VALEN, 1998). A figura 3 mostra uma curva típica de sorção tirada de Kumaran (1996) apud Valen (1998) que define o intervalo higroscópico, o conteúdo de umidade crítico, a saturação capilar e o teor máximo de umidade.



**Figura 3: Isoterma de sorção típica de um material poroso.**

Fonte: Kumaran (1996) apud Valen (1998).

Na figura 3, acima do intervalo higroscópico ocorre condensação capilar. Quando o conteúdo de umidade crítico é alcançado, há continuidade do líquido nos capilares e o transporte na fase líquida é estabelecido. Abaixo deste nível, a umidade é transportada apenas na fase vapor (VALEN, 1998).

Ainda segundo Sato (1998) quando, antes do equilíbrio, o diâmetro do centro do poro for diminuindo em função das camadas adsorvidas e for capaz de conter um

menisco esférico, já está havendo condensação capilar. Esta condensação ocorre nos poros de raios menores que o raio chamado crítico.

### 2.2.2 Fixação e transporte da água

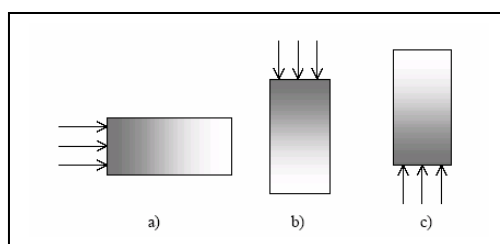
A água na forma líquida se fixa nos poros pelo fenômeno da capilaridade. Durante o transporte, o meio poroso pode estar insaturado ou saturado. No meio insaturado, o transporte é devido ao potencial de sucção do material e a água sobe acima da superfície livre da água pelos interstícios capilares. Em poros maiores que os capilares, o transporte da água é regido pelas leis da hidráulica. Na saturação, a sucção é zero e só há transporte quando é estabelecido um gradiente de pressões.

Laurent (1993) avaliou o transporte de água em pedras e determinou seus teores de água, confrontando os resultados com isotermas de adsorção. Os teores de água medidos nas pedras eram sempre superiores aos valores obtidos nas isotermas, provando que a água não provém unicamente do vapor de água contido no ar e que há necessariamente contribuição de água na forma líquida.

#### 2.2.2.1 Absorção de água por capilaridade

A capilaridade ocorre, principalmente, quando o material está sujeito à migração de água, está exposto a um período de chuva longo e constante e como consequência de condensações capilares, citadas anteriormente.

De acordo com Hall (1994) a influência da força da gravidade pode ser desprezada, por ser muito pequena. Portanto, pode-se considerar que não há diferença significativa na absorção de água nas três situações possíveis (figura 4), para a maioria dos materiais de construção.



**Figura 4: Situações de transporte de água por capilaridade**  
Fonte: Hall (1994)

A capilaridade é devida às forças de coesão e de adesão do líquido, que são forças de atração molecular. A coesão permite ao líquido resistir à tensão de tração, enquanto que a adesão lhe permite aderir a outro corpo. Quando as forças de coesão são menores que as forças de adesão, como é o caso da água, o líquido molha a superfície

sólida com a qual está em contato, aumentando seu ponto de contato com esta superfície. (STREETER, 1961)

As forças de coesão são responsáveis pela tensão superficial da interface líquido – ar, causada pela interação entre as moléculas superficiais do líquido e as moléculas do ar. A tensão superficial mede a rigidez do menisco que separa os fluidos em um tubo capilar. Ela tem dimensão de força por unidade de comprimento e é expressa em N/m.

A curvatura do menisco depende das forças coesivas e adesivas do fluido, do material e de seu grau de pureza. O ângulo formado entre a borda do menisco e a parede do poro resulta do equilíbrio das tensões superficiais do sistema ar-água-sólido e está relacionado com as características do ar, da água e do material sólido (figura 5).



**Figura 5: Ângulo de contato**  
Fonte: Janz (1997)

Onde:

$\sigma_{lg}$  = Tensão superficial entre o líquido e o gás;  
 $\sigma_{sl}$  = Tensão superficial entre o sólido e o líquido;  
 $\sigma_{lg}$  = Tensão superficial entre o sólido e o gás  
 $\alpha$  = Ângulo de contato

Quando as forças de tensão superficial estão em equilíbrio tem-se a equação 1:

$$\sigma_{lg} \cos \alpha = \sigma_{sg} + \sigma_{sl} \quad \text{Eq. (1)}$$

O ângulo de contato caracteriza então a molhabilidade do sólido em relação à dupla líquido/gás considerada.<sup>4</sup> Quanto menor o ângulo de contato, mais molhante o líquido, ou seja, maior sua força adesiva e sua ascensão capilar. A curvatura do menisco é maior e a diferença entre as pressões do ar e da água também aumenta. A diferença entre as pressões é chamada pressão capilar e mede a retenção da água dentro do poro.

4. Se  $\alpha = 0$ : líquido perfeitamente molhante

Se  $\alpha < 90^\circ$  o líquido é molhante

Se  $\alpha > 90^\circ$  o líquido é não-molhante (forças de coesão maiores que as forças de adesão. Ex: mercúrio).

Se a equação não admite solução, o menisco é instável.

A pressão capilar é calculada pela força resultante que age na água. Esta força é produto da circunferência do tubo pela componente vertical da tensão superficial entre o líquido e o gás (equação 2). Dividindo-se a força pela área de secção do tubo, tem-se a pressão capilar. Se considerarmos o tubo como um poro não circular e considerarmos dois raios principais em duas direções ortogonais, tem-se a equação 3, conhecida como a equação de Laplace generalizada:

$$F = 2\pi r_0 \sigma_{lg} \cos \alpha \quad \text{Eq. ( 2)}$$

$$P_c = 2\sigma_{lg} \cos \alpha (1/r_1 + 1/r_2) \quad \text{Eq. ( 3)}$$

Onde:

$\sigma_{lg}$  = Tensão superficial entre o líquido e o gás em N/m;

$\alpha$  = Ângulo de contato

$r_0$  = raio do tubo em m.

$P_c$  = Pressão capilar

$r_1$  e  $r_2$  = Raios do poro

A água deixará de se movimentar, com direção ascendente dentro do tubo, quando o peso da coluna de água exercer uma pressão contrária, suficiente para equilibrar a pressão capilar, ou seja, quando a pressão da coluna de água for igual, em módulo, à pressão capilar. A altura dessa coluna de água dentro do poro capilar é:

$$h = \frac{2\sigma_{lg} \cos \alpha}{r_0 \rho g} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

$\alpha$  = Ângulo de contato

$\sigma_{lg}$  = Tensão superficial entre o líquido e o gás em N/m;

$r_0$  = Raio do poro

$\rho$  = Massa específica do líquido

$g$  = Aceleração da gravidade

Parâmetros diretamente ligados à pressão capilar, como a sucção capilar  $\psi$ , são usados frequentemente para entender o comportamento hidrodinâmico do material não saturado. A sucção expressa a pressão em metros de coluna de água (equação 5):

$$\Psi = -\frac{P_c}{\rho_a g} [m] \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

$P_c$  = Pressão capilar;

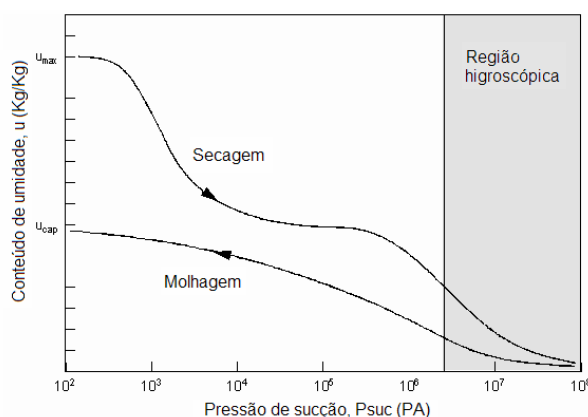
$\rho_a$  = Massa específica da água

$g$  = Aceleração da gravidade

De acordo com Laurent (1996), em um material totalmente saturado, a sucção  $\Psi = 0$ . Para os insaturados, a sucção  $\Psi$  é sempre negativa e pode ser extremamente alta, em valor absoluto, em circunstâncias secas.

A taxa de sucção capilar depende do grau de saturação do meio poroso (MARTYS; FERRARIS, 1997). Para Laurent (1998), a relação entre sucção/teor de água volumétrico é chamada de "curva de retenção de água" e é uma característica intrínseca do material, que deve ser considerada quando este recebe água líquida por capilaridade.

A figura 6 mostra uma curva de sucção típica de um material poroso e descreve a relação entre a pressão de sucção capilar e a quantidade de água acumulada no interior do material.



**Figura 6: Curva de sucção capilar**  
Fonte: Pedersen (1990) apud Valen (1998).

Pode-se perceber que há uma diferença na curva de sucção, quando ela é encontrada a partir da secagem ou molhagem do material. Esta diferença é chamada de fenômeno de histerese. Segundo Fernandes (1990), o aprisionamento de ar nos poros, tende a reduzir o teor de umidade no processo de molhagem.

#### 2.2.2.2 Transporte em meio isotérmico não saturado.

O transporte de água em um material poroso pode acontecer estando este material previamente saturado ou não. Além disso, o material poroso pode estar sob o efeito de gradiente de temperatura. Neste tópico será abordado o transporte de água em um meio poroso isotérmico e não saturado.

A permeabilidade caracterizaria efetivamente o transporte de água líquida de um material, mas infelizmente, em situação real, numa parede de construção, por exemplo, a transferência geralmente ocorre em meios parcialmente saturados.

Para Laurent (1998), a melhor maneira de determinar o transporte de água líquida é considerar a condutividade hidráulica que depende muito e de maneira não-linear do



grau de saturação da água. No meio insaturado, o transporte da água se dá devido ao potencial de sucção do material.

A equação diferencial que governa o movimento da água em meio não saturado é uma interação entre a Lei de Darcy modificada e a equação da continuidade, e será resumida a seguir.

- **Permeabilidade- Lei de Darcy**

A permeabilidade intrínseca ou absoluta de um material poroso corresponde à facilidade de um fluido (gás ou líquido) passar por ele. O grau de permeabilidade é expresso pelo coeficiente de permeabilidade, que depende da porosidade, do tamanho e da distribuição dos poros. O material deve estar totalmente saturado com um único material fluido e com gradiente hidráulico igual a um.

A determinação do coeficiente de permeabilidade a líquidos é feita a partir da lei experimental de Darcy na qual a velocidade de percolação é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico e pode ser escrita conforme equação 6 abaixo. O sinal negativo indica que o movimento é contrário ao sentido do gradiente de potencial hidráulico.

$$Q = -A \frac{K \Delta P}{\mu_l} \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

Q = Taxa de fluxo volumétrico ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );

K = permeabilidade de Darcy ( $\text{m/s}^2$ );

$\mu_l$  = viscosidade dinâmica da água ( $\text{Pa} \cdot \text{s} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )  $\approx 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ;

$\Delta P$  = Diferença de pressão da água ( $\text{Pa} = \text{N/m}^2 = \text{Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ );

A = Área de secção.

Na lei de Darcy a constante de proporcionalidade K não é própria e característica do meio poroso, pois também depende do tipo de fluido. A constante K se decompõe em:

$$K = k \frac{\rho g}{\mu} \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde:

K = Permeabilidade de darcy ( $\text{m/s}^2$ );

k = Permeabilidade intrínseca (que depende somente do meio poroso) ( $\text{m/s}^2$ );

$\rho$  = Massa específica de fluido

$\mu$  = Viscosidade dinâmica do fluido ( $\text{Pa} \cdot \text{s} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

g = Aceleração da gravidade

Sendo  $k$  a verdadeira permeabilidade, definida como permeabilidade intrínseca, citada anteriormente.

Na forma diferencial, a equação de Darcy é escrita como:

$$q = -K \frac{dh}{ds} \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

q = densidade de fluxo;

k = Permeabilidade (m/s<sup>2</sup>);

dh/ds = gradiente de potencial hidráulico (a força) responsável pelo movimento do líquido no meio poroso (m/m);

h = energia da água por unidade de peso (ou potencial hidráulico) (m);

s = coordenada qualquer de posição x, y ou z (m).

- **Condutividade hidráulica**

No meio insaturado, a facilidade com que o fluido passa pelo meio é denominada de condutividade hidráulica e é devida ao potencial de sucção do material, que depende do seu grau de saturação.

Buckinham, em 1907, considerou que, para uma condição não saturada, em um poro ocupado por ar, a área destinada ao fluxo é reduzida e a tortuosidade do fluxo remanescente aumenta. A densidade do fluxo de água diminui e passa a ser considerada como dependente do conteúdo de água ou da pressão de água nos meniscos dos poros e pode ser definida por:

$$q = -K(\theta) \frac{dh}{ds} \quad \text{Eq.(9)}$$

Onde:

q (m/s) é a densidade de fluxo, ou seja, o volume de água por unidade de área e de tempo;

K (m/s) é a condutividade hidráulica (meio não saturado), que é uma função do conteúdo de umidade (θ) ou da pressão da água nos meniscos capilares (p/pg);

dh/ds (m/m) é o gradiente do potencial hidráulico, sendo h= z+ (p/pg), onde:

z é a energia potencial gravitacional e (p/pg) a energia potencial de pressão.

s= coordenada qualquer de posição x, y ou z.

Para a densidade do fluxo dependente do potencial de sucção do material tem-se:

$$q = -K(\psi) \frac{dh}{ds} \quad \text{Eq. (10)}$$

- **Equação da continuidade**

A equação da continuidade ou equação da conservação da matéria simplificada, para o fluxo em uma direção, quando se considera a variação do volume de água dentro

do corpo (figura 7) como  $\Delta V \times \theta$  e a taxa de acumulação da água quando  $\Delta t$  se aproxima de 0, ou seja  $t$  em um instante, devido à densidade de fluxo em uma determinada direção  $x$ , é:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} \quad \text{Eq.(11)}$$

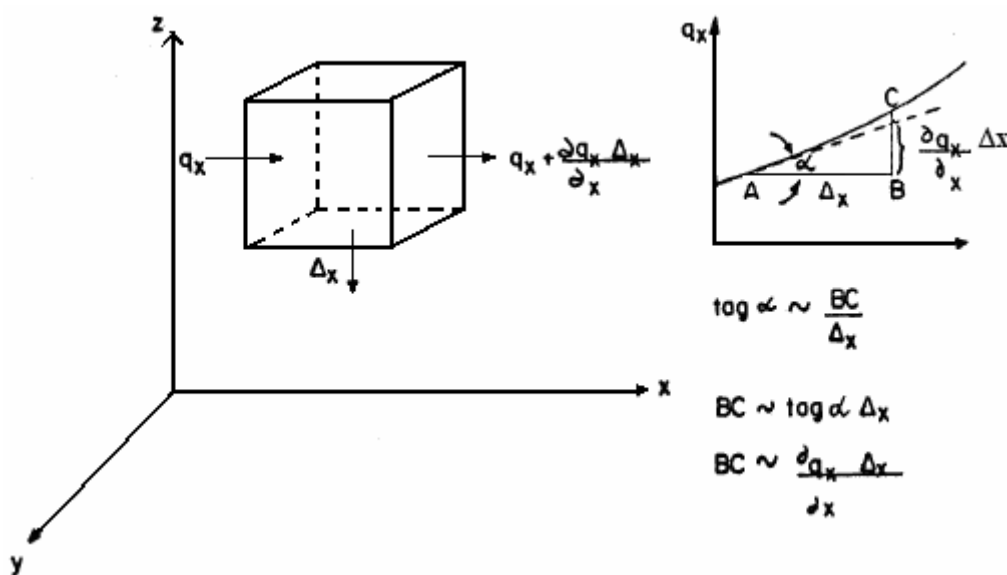
Onde:

$\theta$  = Conteúdo de umidade

$\partial t$  = instante  $t$

$\partial x$  = profundidade  $x$  no instante  $t$

$q_x$  = densidade do fluxo em  $x$



**Figura 7: Elemento de volume de um meio não saturado no qual ocorrem variações na Componente x da densidade de fluxo.**

Fonte: Adaptado de Paes (2004) apud Prevedello (1996)

- **Equação do escoamento unidimensional em meio não saturado**

Substituindo a densidade do fluxo na direção  $x$  pela equação da densidade de fluxo em um meio não saturado para a direção  $x$ , a equação diferencial geral, que governa o movimento de água em meio não saturado, também conhecida como equação de Richards, simplificada para o fluxo em uma direção é expressa por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x(\theta) \frac{\partial (p/\rho g)}{\partial x} \right) \quad \text{Eq.(12)}$$

onde:

$p/\rho g = h$  = energia hidráulica

$K_x$  = condutividade hidráulica em  $x$

$\theta$  = Conteúdo de umidade

$\partial t$  = instante  $t$

$\partial x$  = profundidade x no instante t

- **Difusividade hídrica**

Se, na equação de escoamento unidimensional em meio não saturado, a dependência da energia hidráulica ( $p/\rho g$ ) em relação à umidade e a dependência da umidade em relação à posição e ao tempo, for considerada, tem-se para o fluxo na direção x:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\theta) \frac{d(p/\rho g)}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] \quad \text{Eq.(13)}$$

Onde:

$p + \rho g = h$  = energia hidráulica

$K_x$  = condutividade hidráulica

$\theta$  = Conteúdo de umidade

$\partial t$  = instante t

$\partial x$  = profundidade x no instante t

onde o termo  $K(\theta) \frac{d(p/\rho g)}{d\theta}$  é considerado como a difusividade hídrica, simbolizada por  $D(\theta)$ .

A equação 12 (equação diferencial, que governa o movimento de água em meios não saturados, na direção x) pode ser expressa pela equação 14, citada por Philip (1958):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] \quad \text{Eq.(14)}$$

- **Modelo matemático para a infiltração por capilaridade.**

Para a infiltração por capilaridade, a equação diferencial do movimento de água em meios não saturados é considerada, no seu caso de uma infiltração horizontal (sem a ação da gravidade), que é o que acontece na infiltração por capilaridade.

Para resolver a equação diferencial do movimento de água em meios não saturados, ela é transformada em uma equivalente linear da qual se pode obter uma solução analítica.

De acordo com Philip (1958), as seguintes condições de contorno de  $\theta$  são consideradas:

$$\theta = \theta_f \text{ para } x = 0 \text{ e } t > 0$$

$$\theta = \theta_a \text{ para } x \rightarrow \infty \text{ e } t > 0$$

$$\theta = \theta_i \text{ para } x > 0 \text{ e } t = 0$$

Onde:

$\theta$  = Conteúdo de umidade

$\theta_f$  = Conteúdo de umidade final (saturado)

$\theta_a$  = Conteúdo de umidade, devido ao ganho de água, num instante t.

$\theta_i$  = Conteúdo de umidade inicial

e a transformada de Boltzmann<sup>5</sup> é usada para transformar a equação 14 em uma equação diferencial ordinária:

$$-\frac{\varphi}{2} \frac{d\theta}{d\varphi} = \frac{d}{d\varphi} (D \frac{d\theta}{d\varphi}) \quad \text{Eq.(15)}$$

Em seguida,  $\theta$  é transformada em uma variável independente, multiplicando-se ambos os lados da equação 15 por  $d\varphi/d\theta$ :

$$-\frac{\varphi}{2} = \frac{d}{d\theta} (D \frac{d\theta}{d\varphi}) \quad \text{Eq.(16)}$$

Cuja integração leva a:

$$\int_{\theta_i}^{\theta} \varphi d\theta = -2D d\theta/d\varphi \quad \text{Eq.(17)}$$

Sujeita às condições:

$$\theta = \theta_i \quad \text{e} \quad \varphi = 0.$$

A equação 17 permite conhecer a dependência da difusividade hídrica, com o conteúdo de umidade, obtido experimentalmente.

## 2.3 Propriedades físicas, elétricas e hidrodinâmicas

---

<sup>5</sup>  $\varphi = x t^{-1/2}$

A determinação de propriedades físicas e hidrodinâmicas é essencial para compreensão do comportamento hidrodinâmico dos materiais. De Freitas; Abrantes; Crausse (1996) citam que as equações diferenciais para transferência de massa e calor, usadas em modelos matemáticos, utilizam parâmetros que dependem da umidade e da temperatura.

Para Laurent (1998), pode-se ainda considerar uma propriedade através de outra que lhe seja correlacionada, porém mais fácil de medir, como a difusividade hídrica a partir de medidas elétricas.

Nos tópicos seguintes, propriedades físicas e hidrodinâmicas são abordadas, (destaque para aquelas avaliadas na pesquisa) com enfoque na cinza pesada e no agregado reciclado de resíduo de construção e demolição, usados neste trabalho.

Nesta pesquisa, nos sub-capítulos e capítulos que se seguem, a cinza pesada será referenciada como CzP e o agregado reciclado de construção e demolição como AGR.

No geral, em cada tópico, primeiro serão abordados o material granular CzP e depois o AGR. Em seguida, os materiais cimentícios com CzP e AGR respectivamente. Alguns métodos de determinação dessas propriedades também são apresentados e por fim, a influência e relevância dessas propriedades nas características hidrodinâmicas dos materiais são comentadas.

### **2.3.1 Superfície específica e granulometria dos grãos**

A superfície específica indica a finura do material. Ela é definida pela relação entre a soma das áreas superficiais das partículas e a sua massa. É geralmente expressa em  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Quanto menores as partículas ou maior a quantidade de partículas pequenas, maior a superfície específica, que varia em função da distribuição do tamanho dos grãos.

A superfície específica interfere na retenção de água. Segundo Neville (1997), a pasta de cimento fresca deve cobrir a superfície de todas as partículas. Quanto maior a área de superfície das partículas, maior a quantidade de pasta e, portanto, de água.

De acordo com Cheriaf; Rocha (1997), a cinza pesada possui muitas partículas menores que 0,15mm, o que aumenta sua superfície específica e requer maior quantidade de líquido para molhar as partículas.

Andrade (2004) e Santos (2006) identificaram uma porcentagem de material, com diâmetro menor que 0,15mm, de 26%, em massa, na cinza pesada avaliada. Andrade (2004), considerando a grande quantidade de finos presentes na cinza, realizou o ensaio de peneiramento, com e sem lavagem do material, para avaliar a porcentagem

de finos aderidos às partículas maiores. O autor observou uma perda de massa de até 8% nas frações granulométricas.

No agregado reciclado, de acordo com Lima (1999), sua granulometria varia com a composição do resíduo e com os equipamentos utilizados na britagem.

Corinaldese e Moriconi (2008) analisaram agregados reciclados miúdos mistos, de concreto e de alvenaria. Foram encontrados valores maiores de finos, passantes na peneira 0,15mm, em agregados reciclados cerâmicos (20 % em massa), enquanto que o reciclado misto e o reciclado de concreto obtiveram 8% e 10% de grãos menores que 0,15mm, respectivamente.

Segundo Landi (1987) apud Bavaresco (2001), os finos de natureza argilosa do AGR melhoram a plasticidade da mistura, mas em excesso, necessitam de mais água de amassamento.

Para Lima (1999), pode ser necessário eliminar-se parte da fração miúda do agregado para melhorar propriedades, como a absorção de água e reduzir os riscos do surgimento de patologias devido à presença de contaminantes, cujo teor tende a ser maior na fração miúda.

Quando a granulometria de um material granular é contínua, os poros formados por esse material são mais finos. Isto acontece porque as partículas menores preenchem os vazios entre as partículas maiores, afetando a absorção de água capilar desse material. Considerando um mesmo material que teve seus poros refinados com a presença de grãos menores, a porosidade diminui e menor é a quantidade de água absorvida. Entretanto, entende-se que a velocidade de absorção do material granular mais fino é maior, devido ao maior potencial de sucção de seus poros.

Quando usado em misturas cimentícias, materiais granulares com granulometria mais fina e maior superfície específica necessitam mais água de mistura para molhar as partículas do material e formam materiais com poros menores e maior potencial de sucção (considerando-se somente estas características do material).

### **2.3.2 Forma e textura superficial dos grãos**

A forma e a textura do agregado miúdo têm um efeito significativo sobre a demanda de água de uma mistura. As partículas mais angulosas exigem mais água, para uma mesma trabalhabilidade (NEVILLE, 1997).

Segundo Cheriaf, Rocha (1997) os grãos de cinza pesada apresentam-se predominantemente sobre a forma arredondada, principalmente nas menores dimensões.

De acordo com Bazuco (1999) os AGRs tendem a ser mais angulares que os agregados naturais e com superfície mais porosa e rugosa. O autor atribuiu a porosidade e a rugosidade do agregado à quantidade de argamassa aderida, que é mais rugosa e porosa do que o agregado natural. Para Lima (1999) as parcelas miúdas do AGR possuem maior teor de argamassa aderida.

Os grãos de AGR também tendem a ser lamelares em função do tipo de fissuração que sofrem durante a britagem.

Os agregados reciclados finos (0 a 6mm) e graúdos (6 a 20mm) analisados por Buyle-Bodin e Hadjieva-Zaharieva (2002), apresentaram a superfície fissurada, o que, de acordo com as autoras, contribui para o aumento do fluxo de água e ar para o interior dos agregados e entre a pasta de cimento e os agregados.

Materiais granulares angulares e lamelares tendem a formar poros mais tortuosos, inclusive quando utilizados como agregados em materiais cimentícios e tendem a reduzir a conectividade desses poros. O aumento da tortuosidade dificulta a penetração de água e a redução da conectividade dos poros diminui a quantidade de água absorvida, uma vez que o número de poros acessíveis à penetração de água diminui.

### **2.3.3 Massa específica aparente seca e Massa unitária seca**

A massa específica de um material é influenciada pela sua porosidade. Além da porosidade, a distribuição de tamanho e a forma dos grãos influenciam sua massa unitária.

Andrade; Rocha; Cheriaf (2007) perceberam uma redução de mais de 31% na massa específica da CzP, quando comparada a uma areia natural e de mais de 61% em sua massa unitária.

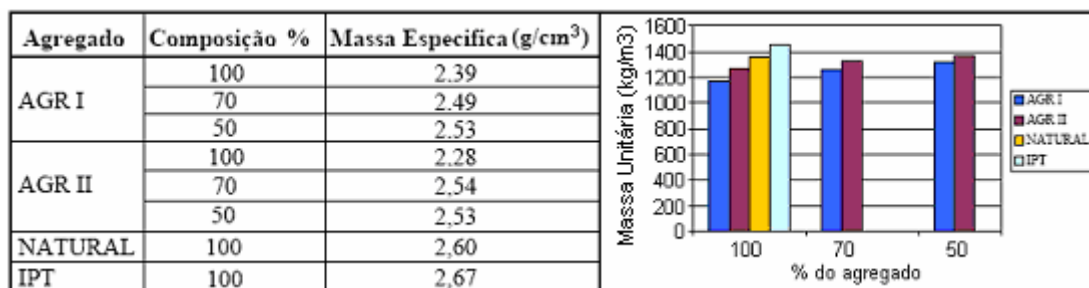
Quanto aos agregados reciclados, Bazuco (1999) cita que sua massa específica é menor que a dos agregados naturais, devido à massa específica relativamente menor da argamassa aderida às partículas do agregado original.

Os agregados reciclados finos analisados por Buyle-Bodin e Hadjieva-Zaharieva (2002) apresentaram uma redução de 19% na massa específica quando comparados a agregados convencionais.

Bavaresco (2001) analisou agregados reciclados miúdos de resíduo cerâmico e cimentício e comparou os resultados com a massa específica de agregado miúdo natural e agregado produzido pelo IPT (figura 9). A massa específica do AGR estudado pelo autor era cerca de 10% inferior à do agregado natural. As massas unitárias dos agregados



analisados por Bavaresco (2001) também apresentaram resultados inferiores à dos convencionais (figura 8).



**Figura 8: Massas específicas aparentes e massas unitárias, onde: AGR I = com resíduo cerâmico AGR II com resíduo cimentício.**

Fonte: Adaptado de Bavaresco (2001).

Ângulo *et al* (2004) analisaram a massa específica de agregados reciclados, através de separação por líquidos densos. Segundo os autores, os agregados com densidade maior que 2,5g/cm<sup>3</sup> são predominantemente rochas naturais, envoltas por uma camada de pasta de cimento, sendo o teor de pasta relativamente baixo e que agregados com densidade entre 1,9 e 2,5g/cm<sup>3</sup> são predominantemente cerâmicos (vermelha e branca) e partículas cimentícias com teor de pasta superior ao das partículas mais densas.

Corinaldese e Moriconi (2008) também encontraram valores diferentes de massa específica para agregados de origem cerâmica e cimentícia. Ainda, as massas específicas dos agregados reciclados também se apresentaram inferiores quando comparados a um agregado convencional cuja massa era de 2,59 g/cm<sup>3</sup>. Os agregados de origem cerâmica apresentaram menor massa específica (2,06 g/cm<sup>3</sup>), seguidos pelo agregado misto (2,29 g/cm<sup>3</sup>) e o agregado de concreto, com 2,38 g/cm<sup>3</sup>.

No referente a materiais cimentícios, Lenzi (2001) analisou argamassas de cimento, cal e areia, com CPI-32, na proporção de 1: 2: 9 (cimento: cal: areia). O autor encontrou uma redução superior a 20% na massa específica da mistura com 100% de cinza pesada, como agregado miúdo. Santos (2006), em argamassas de cimento cal e areia, na proporção de 1:2:7:0,43 (cimento: cal: areia: a/c), com CII F-32, encontrou resultados similares (redução de 26%) aos de Lenzi (2006), quando o agregado miúdo das misturas foi totalmente substituído por CzP.

Em Santos (2006), pôde ser verificado um aumento da porosidade aberta das argamassas, com a diminuição da massa específica, em função da substituição do agregado miúdo convencional pela cinza pesada (tabela 1).

Tabela 1: Massas específicas no estado endurecido

Argamassa/Propriedade	Massa específica - NBR 13280 (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa específica - mercúrio (kg/dm <sup>3</sup> )	Porosidade aberta (%)	
			Média	Desvio
0% CZP	1,67	1,74	29,8	0,5
50% CZP	1,45	1,50	33,6	0,3
100% CZP	1,24	1,27	37,0	0,4

Fonte: Adaptado de Santos (2006)

Materiais com menor massa específica e unitária sugerem uma maior porosidade, parâmetro importante para seu comportamento hidrodinâmico.

Quando usados em argamassas, agregados com massa específica inferiores, diminuem a massa específica das misturas. Essa tendência influencia na porosidade final das argamassas, que é uma propriedade importante no comportamento hidrodinâmico dos materiais.

### 2.3.4 Porosidade.

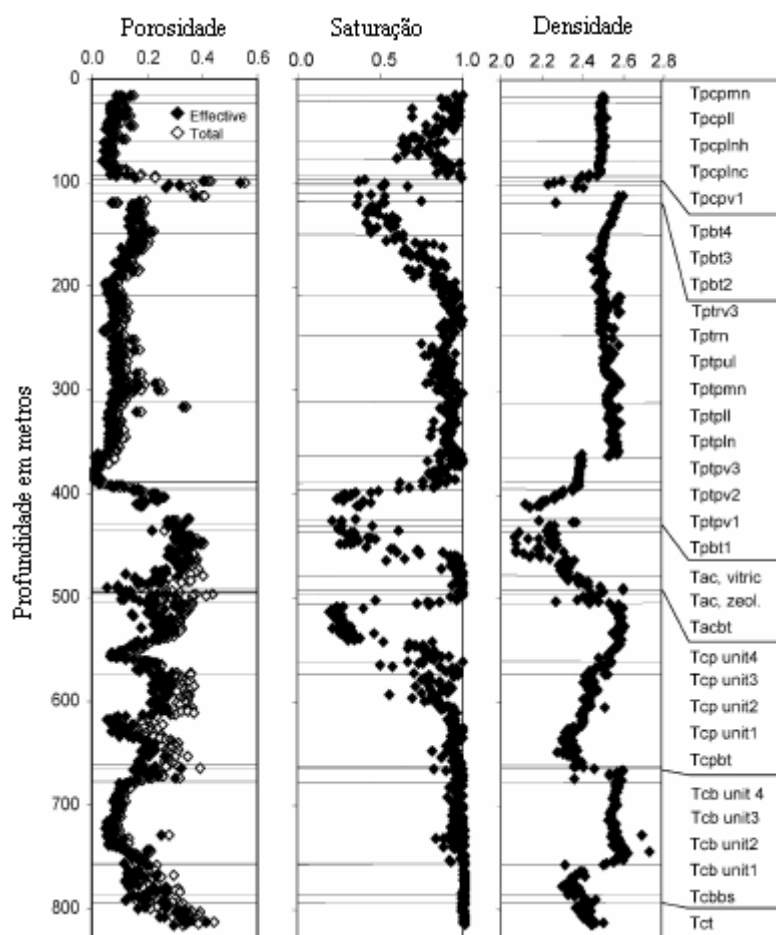
A porosidade de um material divide-se em aberta e fechada, sendo a primeira formada pelos poros conectados. Esta propriedade está intimamente ligada com a entrada de água e agentes deletérios no meio, que se dá pelos poros.

Andrade; Rocha; Cheriaf (2007) realizaram misturas entre a cinza pesada e areia natural e constataram que a porosidade do material granular aumentava gradativamente com o aumento do teor de CzP, de menor massa específica, na mistura. Entre a mistura referência com 100% de areia natural e a mistura com 100% de CzP, houve um acréscimo de 58% na porosidade.

A dependência entre a porosidade e a massa específica é uma relação conhecida dos materiais porosos. Esta relação também pode ser verificada na figura 9 de Flint; Selker (2003) que analisaram mais de 600 amostras de rochas vulcânicas<sup>6</sup>.

Na figura pode-se observar que à medida que a porosidade (primeira coluna) aumenta, a massa específica (terceira coluna) diminui. Os tipos de rocha são identificados na coluna 4 e delimitados por linhas verticais.

<sup>6</sup> Material poroso, formado por cinzas consolidadas, ejetadas pelo vento, durante erupção vulcânica.



**Figura 9: Medição da porosidade, saturação e densidade em poço de 800m de profundidade, na montanha Yucca, Nevada.**

Fonte: Flint; Selker (2003)

Quanto aos agregados reciclados, segundo Bairagi *et al* (1993) apud Bazuco (1999) os AGRs também possuem porosidade maior que os agregados naturais, devido à argamassa (cuja densidade é menor) aderida às partículas. De acordo com Lima (1999) os agregados miúdos possuem mais argamassa aderida do que os agregados graúdos.

Em materiais cimentícios, Santos (2006) verificou uma relação nítida entre a porosidade e o teor de CzP, como pode ser revisto na tabela 1. O uso da CzP implica em argamassas com maior volume de poros permeáveis a água (SANTOS, 2006).

A distribuição do tamanho dos poros, sua tortuosidade e conectividade também são propriedades do meio poroso.

O tamanho dos poros determina seu potencial de retenção de água e, conseqüentemente, a sucção necessária para saturá-lo ou retirar água. Quanto maior o tamanho do poro, menor a sucção aplicada para que o material absorva ou perca água, e quanto menor o tamanho do poro, consideravelmente maior será a sucção necessária.

A técnica de porosimetria por mercúrio é usada para identificar a distribuição do tamanho de poros e consiste em introduzir progressivamente mercúrio na rede porosa, inicialmente vazia, com aplicação de pressão,<sup>7</sup> saturando-o progressivamente.

O resultado do teste é uma curva de intrusão de mercúrio  $V_{Hg} = f(P_{Hg})$ . As pressões são convertidas em diâmetros de poros cilíndricos  $d$  usando-se a lei de Laplace<sup>8</sup>. Sabendo-se dos valores dos parâmetros do mercúrio, a lei de Laplace é reescrita abaixo:

$$d[\mu m] = \frac{1,5}{P_{Hg}[MPa]} \quad \text{Eq. (18)}$$

Onde:

$d$  = Diâmetro do poro

$P_{Hg}$  = Pressão do mercúrio

A limitação desta técnica, segundo Fernandes (1990), é o efeito "garganta"<sup>9</sup>. Daian; Laurent (1996) também citam a pressão máxima que pode ser aplicada na amostra, dependendo do aparelho utilizado, como outra limitação. O menor tamanho de poro obtido estará condicionado à máxima pressão utilizada.

Barbare, S'hukla, Bose (2003) utilizaram um microscópio eletrônico para observar o tamanho dos poros de concretos com cinzas e concretos normais. No concreto com cinzas foram observados poros variando de  $2.9 \times 10^{-7}$  a  $5 \times 10^{-7}$  m. Entretanto, no cálculo do raio do poro dos concretos com cinza, pela equação de Washburn<sup>10</sup>, seu tamanho eficaz deveria ser de  $0.6 \times 10^{-9}$  m, considerando a quantidade de água absorvida. Isso mostra que, além do raio, outros fatores influenciam no conteúdo de água absorvida, como a tortuosidade e a conectividade dos poros. Quanto maior a tortuosidade e menor a conectividade do material, maior a dificuldade de penetração da água.

O fator tortuosidade é dado pelo quadrado da razão entre o comprimento do caminho efetivo médio dos poros ( $L_e$ ) e a distância mais curta ( $L$ ), medidos em uma mesma direção (equação 19).

$$\tau = (L_e/L)^2 \quad \text{Eq. (19)}$$

Onde:

$\tau$  = Tortuosidade

$L_e$  = Comprimento do caminho efetivo médio dos poros

$L$  = Distância mais curta no caminho dos poros

<sup>7</sup> Como o mercúrio é um líquido não molhante, ele não penetra naturalmente e é necessário exercer uma pressão externa superior à pressão capilar para provocar a sua intrusão.

<sup>8</sup> A lei de Laplace foi explicada anteriormente.

<sup>9</sup> Os poros ora são mais estreitos, ora mais largos, ao longo de sua extensão, o que prejudica a identificação de seu tamanho, por pressão necessária para penetração do mercúrio.

<sup>10</sup> A equação de Washburn relaciona o valor de água absorvida e o raio médio dos poros. Este conceito será explicado mais adiante.

Ele pode ser utilizado para estimar a resistividade de um material, usando a fórmula modificada de Archie e para prever a saturação de água de um meio (AZAR *et al*, 2008). A lei de Archie generalizada para um meio saturado é expressa por:

$$F_R = F_F \Phi^{-m} \quad \text{Eq. (20)}$$

Onde:

$F_R$  = Resistividade elétrica do material totalmente saturado;

$F_F$  = Resistividade do fluido;

$\Phi$  = Porosidade;

$m$  = Índice de cimentação (dá a medida da tortuosidade e da conectividade). Varia de 1,3 para areias não consolidadas e 2,3 para rochas compactas, de baixa porosidade. É dado pela inclinação da reta do gráfico da Resistência x Porosidade em coordenadas Log-Log.

Considerando que  $m$  seja sempre positivo, quanto maior a porosidade do material, menor a sua resistividade.

Para um meio insaturado tem-se:

$$F_R = a \Phi^{-m} S_w^{-n} F_F \quad \text{Eq. (21)}$$

Onde:

$a$  = constante empírica de proporcionalidade, que depende do tipo de meio presente ( $0,6 < a < 1,5$ );

$S_w$  = Grau de saturação do meio;

$n$  = Expoente de saturação, normalmente igual a 2.

De acordo com Amyx *et al* (1960) apud Azar *et al* (2008), na maioria dos experimentos de laboratório, a porosidade e a resistividade são relacionadas com a tortuosidade pela equação:

$$(F \Phi)^x = \tau \quad \text{Eq. (22)}$$

Onde:

$F$  = Fator de formação da resistividade =  $F_R/F_F$

$\tau$  = Tortuosidade aparente, considerando-se a porosidade aberta como porosidade total;

$x$  = Correlação constante, varia de 0,5 a 1,5. Na prática é geralmente igual a 2.

Se considerarmos a porosidade usada na equação acima como aparente, a tortuosidade real é dada por:

$$(F \Phi^m)^x = \tau_r \quad \text{Eq. (23)}$$

Onde:

$\tau_r$  = Tortuosidade real

A porosidade de um material e seus fatores (tamanho, tortuosidade e conectividade) são as propriedades que mais influenciam no transporte de umidade no meio poroso, visto que a penetração da água se dá pelos poros.

### 2.3.5 Resistência e condutividade elétrica

A resistência de um material consiste na sua resistência à passagem de eletricidade. A condutividade indica a facilidade do material em conduzir corrente elétrica.

A resistência elétrica é altamente sensível ao teor de umidade de equilíbrio e à temperatura, reduzindo-se com o aumento desta (LEVY, 2001). Segundo Garboczi (1990) apud Levy (2001) a resistência é um parâmetro que possibilita prever o comportamento hidrodinâmico e os fenômenos de difusão de materiais cimentícios.

A resistividade é a resistência elétrica específica, que considera a área de seção e o comprimento por onde passa a corrente. Ela é o inverso da condutividade elétrica.

A resistividade, a condutividade e a difusividade de materiais porosos cimentícios podem ser relacionadas pela equação abaixo:

$$F = \frac{\text{Resistividade do sistema}}{\text{Resistividade da água nos poros}} = \frac{\text{Condutividade da água nos poros}}{\text{Condutividade do sistema}} = \frac{\text{Difusividade da água nos poros}}{\text{Difusividade do sistema}}$$

Onde F é o fator de formação da resistividade, já citado anteriormente, que depende da porosidade e da estrutura dos poros.

Tumidajski *et al* (1996) determinaram o fator de formação de resistividade elétrica de pastas com idade entre 17 e 29 anos e argamassas com idade de 28 dias, por eletrodos pressionados contra as faces das amostras. A resistividade elétrica do material, do fluido de seus poros e a porosidade total por intrusão de mercúrio foram medidas e os dados experimentais foram plotados para analisar a validade da equação de Archie (figura 10).

No estudo, a porosidade das pastas aumentou com o aumento da relação a/c, enquanto que o fator de formação de resistividade diminuiu. Nas argamassas, a relação a/c foi mantida em 0,35. Com o aumento do volume de agregado, a porosidade diminuiu e o fator de formação aumentou.

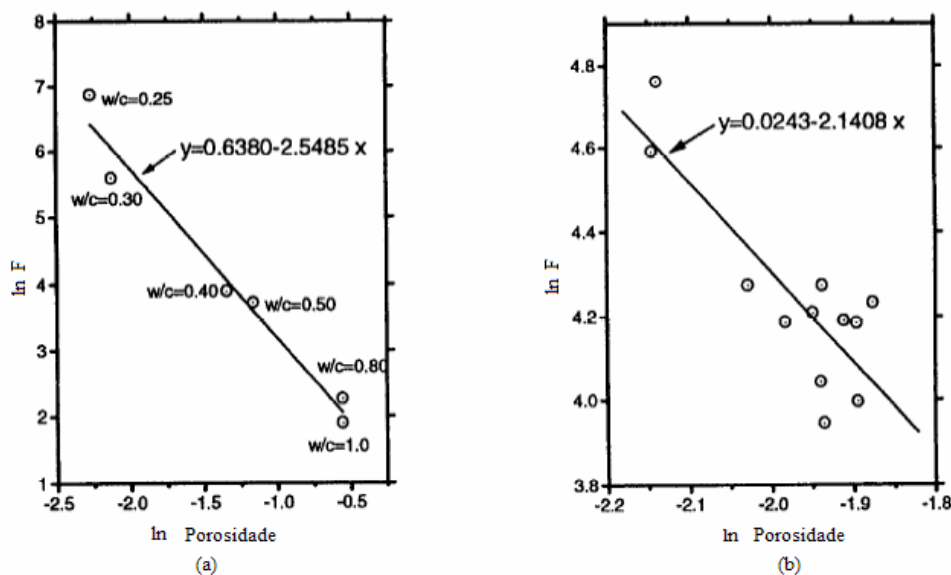


Figura 10: a) Dados das pastas. b) Dados das argamassas  
Fonte: Adaptado de Tumidajski *et al* (1996)

Os autores constataram que para as pastas, cujo processo de hidratação estava bastante avançado, houve um bom ajuste dos dados à equação. Entretanto, para as argamassas de 28 dias, esse ajuste foi menor, mas dentro do esperado para materiais cimentícios, cujo meio poroso é complexo.

Entende-se com o estudo que a relação entre o fator de formação da resistividade e a porosidade dos materiais, não se apresenta claramente linear. Há uma variação da relação em função da complexidade e dos constituintes do meio poroso.

Zakri; Laurent (1996) usaram a TDR (*Time Domain Reflectometry*) para medir a permissividade dielétrica de diversos materiais porosos. O método consiste em medir a permissividade dielétrica relativa do meio medindo o tempo de viagem  $t_p$  de um pulso elétrico, ao longo da amostra de comprimento  $L$  do material testado, considerado dielétrico. Conhecendo  $L$  tem-se:

$$\epsilon = (c t_p / L)^2 \quad \text{Eq. (24)}$$

Onde:

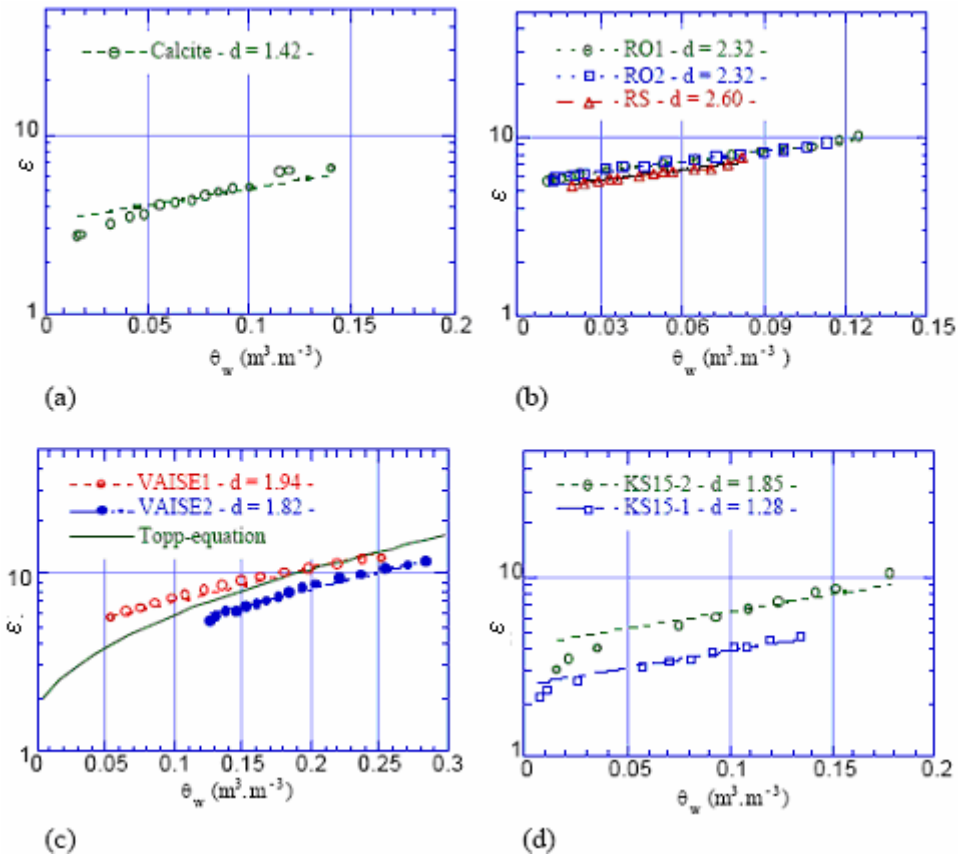
$\epsilon$  = Permissividade dielétrica

$c$  = velocidade da luz ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )

$t_p$  = Tempo de viagem de um pulso elétrico

$L$  = Comprimento da amostra

O conteúdo de umidade foi relacionado com os valores de permissividade. Para os solos avaliados, quanto maior o conteúdo de água e a densidade (menor porosidade) maior a permissividade dielétrica. (figura 11).



RO1 e RO2 e RS=pedras com grande quantidade de calcita e quartzo respectivamente, KS15-1 e KS15-2= Pedras com Kaolinite e quartzo; VAISE 1 e 2= Solos naturais.

**Figura 11: Relação entre a permissividade dielétrica e conteúdo de umidade.**

Fonte: Zakri; Laurent (1996).

Os resultados de Zakri; Laurent (1996) se aproximaram da equação teórica de Olhoeft de 1975:

$$\varepsilon = a^{\rho_m} \varepsilon_w(T)^{\theta_v} \quad \text{Eq. (25)}$$

onde:

$\varepsilon$  = Permissividade dielétrica do material;

$\varepsilon_w$  = Permissividade dielétrica da fase líquida do material ( em temperatura ambiente = 79,4);

$\theta_v$  = Volume total;

$\rho_m$  = Massa específica aparente do material;

$a$  = Parâmetro que depende da mineralogia e da densidade dos grãos do material;

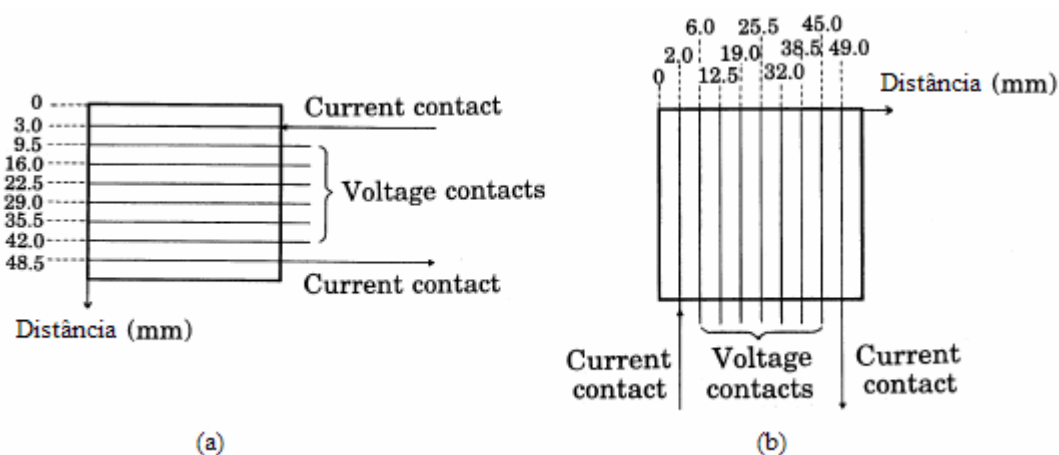
$T$  = Temperatura.

Para Wang; Chung (1998), pouca atenção tem sido dada para a distribuição espacial das propriedades nos materiais cimentícios. Ou seja, a variação das propriedades destes materiais em toda sua extensão. Os autores avaliaram a resistividade elétrica ao longo de corpos de provas de argamassas de traço 1: 1: 0,45 (em proporção de cimento, areia e relação água/cimento) e observaram que a resistividade medida nas amostras variava ao longo de sua extensão. Foram inseridos eletrodos ao longo de um



cubo de argamassa de 51mm de aresta, perpendicular à direção onde a resistividade foi medida (figura 12). As amostras foram curadas a 100% de umidade relativa.

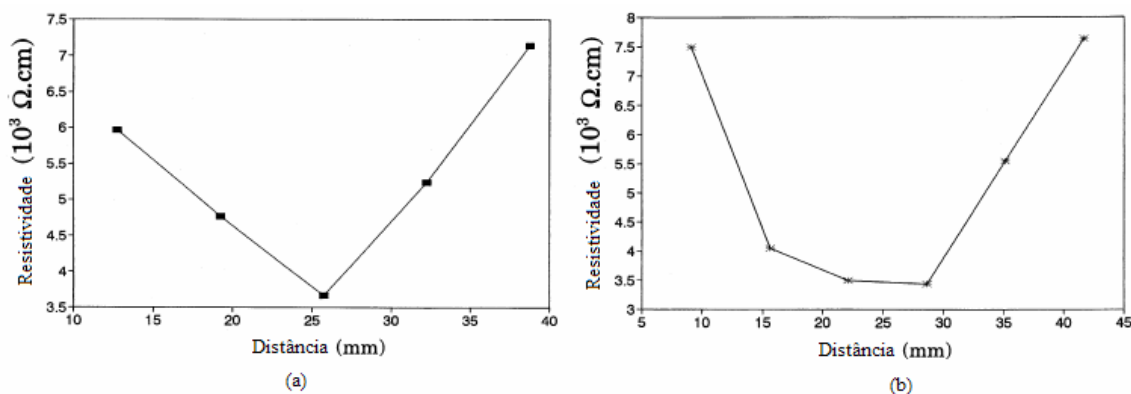
Os eletrodos nas extremidades foram usados para passar a corrente. Os eletrodos intermediários foram usados em pares como pontos de voltagem. Foi medida a resistência entre cada par de pontos de voltagem. Foram ensaiadas, no mínimo, três amostras para cada situação.



**Figura 12: a) Amostra para medição da resistividade na direção vertical. b) Amostra para medição da resistividade na direção horizontal.**

Fonte: Adaptado de Wang; Chung (1998).

As resistividades medidas em ambas as direções apresentaram menores valores nos centros das amostras do que nas suas extremidades, cujo valor foi aproximadamente o dobro dos valores de resistividade no centro dos corpos de prova (figura 13).



**Figura 13: a) Resistividade medida no sentido vertical. b) Resistividade medida no sentido horizontal**

Fonte: Adaptado de Wang; Chung (1998).

Também foram ensaiados corpos de prova de dimensões 160 x 40 x 40 mm e relação a/c de 0,32. Os autores observaram uma faixa de 60mm ao longo da região central do corpo de prova, com comportamento uniforme (mesma faixa de resistência) e

sugeriram que o aumento da resistividade do centro para as bordas é causado por um “efeito de borda” que se estende por aproximadamente 50mm da borda para o centro das amostras.

Os autores atribuíram essa variação da resistividade ao longo das amostras à secagem mais rápida nas extremidades do que no centro dos corpos de prova, resultando em ligações mais fracas entre a pasta de cimento e a areia nas extremidades do que no centro, o que pôde ser confirmado pelo ensaio de dureza Rockwell (figura 14).

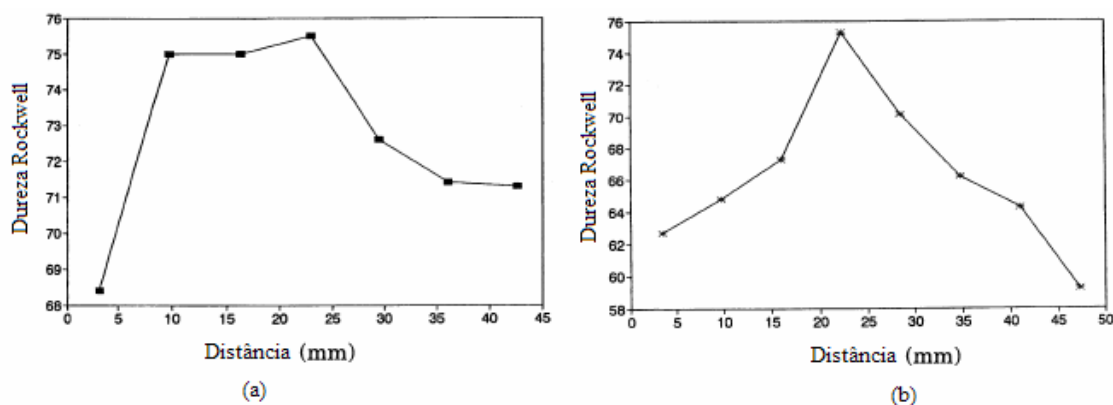


Figura 14: a) Ensaio de dureza no sentido vertical. b) Ensaio de dureza no sentido horizontal.

Fonte: Adaptado de Wang; Chung (1998).

Foi sugerido que com uma cura a umidades relativas menores do que a utilizada para as amostras do estudo, essa variação na resistência seja ainda maior.

Entende-se, portanto, que a secagem mais rápida das extremidades provoca diferença nas zonas de transições dessa região, com ligações mais pobres entre a pasta e o agregado, que a torna mais fraca e afeta sua resistividade.

McCarter; Starrs; Chrisp (2000) estudaram a condutividade elétrica de argamassas de cimento saturadas (tabela 2) ao longo de 450 dias de hidratação. Três adições pozolânicas foram utilizadas para substituir o cimento: escória de alto forno (GGBS), metacaulin (MK) e sílica ativa (MS).

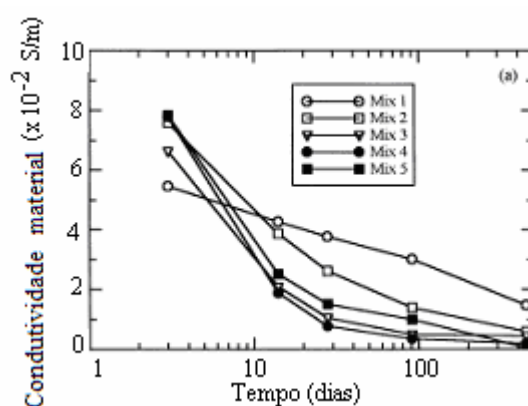
Tabela 2: Misturas das argamassas

Materials	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5
OPC	1	0.5	0.8	0.8	0.5
GGBS	+	0.5	+	+	0.3
MK	+	+	0.2	+	0.2
MS	+	+	+	0.2	+
Fine aggregate	3	3	3	3	3
Water/binder ratio (by mass)	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
$F_{28}$ MPa	19	16	26	22	21

Fonte: McCarter; Starrs; Chrisp (2000)

Os tempos de medida de condutividade foram 3, 14, 28, 90 e 450 dias. Aos 450 dias as amostras foram submetidas à variação de temperatura. Inicialmente a 20°C, houve um aumento para 50°C, seguido de um decréscimo para 10°C e novo aumento para 50°C. Antes da medição, as amostras foram mantidas por dois dias, em cada temperatura. A umidade relativa do ar era de 100%.

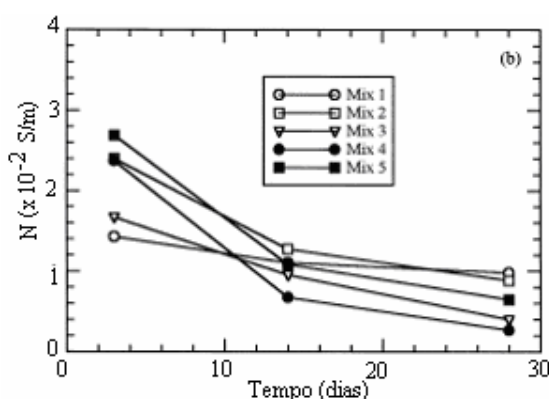
Os autores perceberam um decréscimo da condutividade ao longo do tempo (figura 15). As condutividades das misturas com adições pozolânicas caíram mais rápido, após os 28 dias, e a longo prazo, mantiveram-se menores, o que, segundo os autores, indica a influência da reação pozolânica, reduzindo os poros capilares conectados e mudando as concentrações iônicas dentro do fluido dos poros.



**Figura 15: Decréscimo da condutividade ao longo do tempo a 20°C.**

Fonte: McCarter; Starrs; Chrisp (2000)

Também foram realizadas medições de condutividade do fluido do poro, extraídos de cilindros da argamassa, às idades de 3, 14 e 28 dias. A relação entre as duas condutividades, chamada condutividade N, foi avaliada ao longo do tempo na figura 16.



**Figura 16: Decréscimo de N ao longo do tempo.**

Fonte: McCarter; Starrs; Chrisp (2000)

Considerando que  $N$  diminui ao longo do tempo, isso implica que a condutividade do meio diminui a um ritmo mais rápido que a condutividade do fluido dos poros. As mudanças microestruturais (como aumento da tortuosidade e restrição dos poros) exercem, portanto, um efeito mais dominante sobre a condutividade medida do que a química do fluido do poro (MCCARTER; STARRS; CHRISP, 2000).

Quanto à variação de temperatura, os autores concluíram que:

- a) A condutividade do fluido dos poros aumenta com o aumento da temperatura;
- b) No âmbito da rede de poros, a composição química do fluido dos poros pode mudar devido a mudanças na solubilidade das fases mineralógicas. A dissolução pode aumentar a concentração iônica no fluido dos poros, aumentando a sua condutividade;
- c) Mudanças microestruturais, resultando em uma redução da porosidade conectada, diminuiriam a condutividade do material.

A figura 17 mostra a alteração na condutividade do fluido dos poros, quando submetido à variação de temperatura de 10 a 50°C. No gráfico os dados foram plotados seguindo o formato de Arrhenius<sup>11</sup>:

$$\text{condutividade elétrica da massa} = Ae^{(E_a/RT)} \quad \text{Eq. (26)}$$

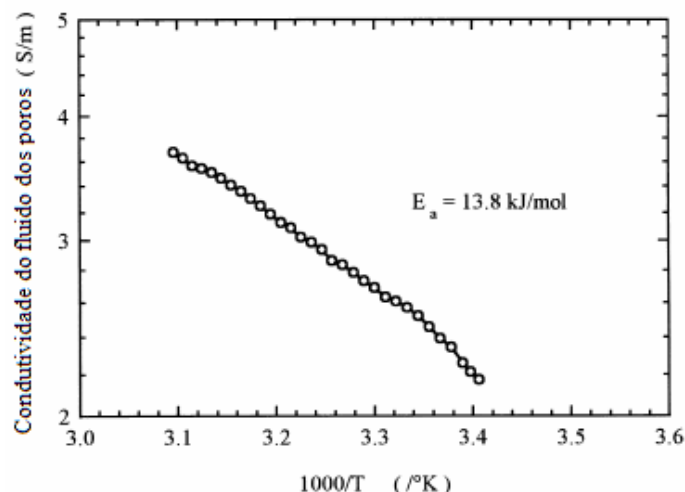
Onde:

$A$  = pré- exponencial constante;

$R$  = Constante do Gás (8.314 J/K mol);

$T$  = Temperatura absoluta;

$E_a$  = Energia de ativação para o processo de condução.



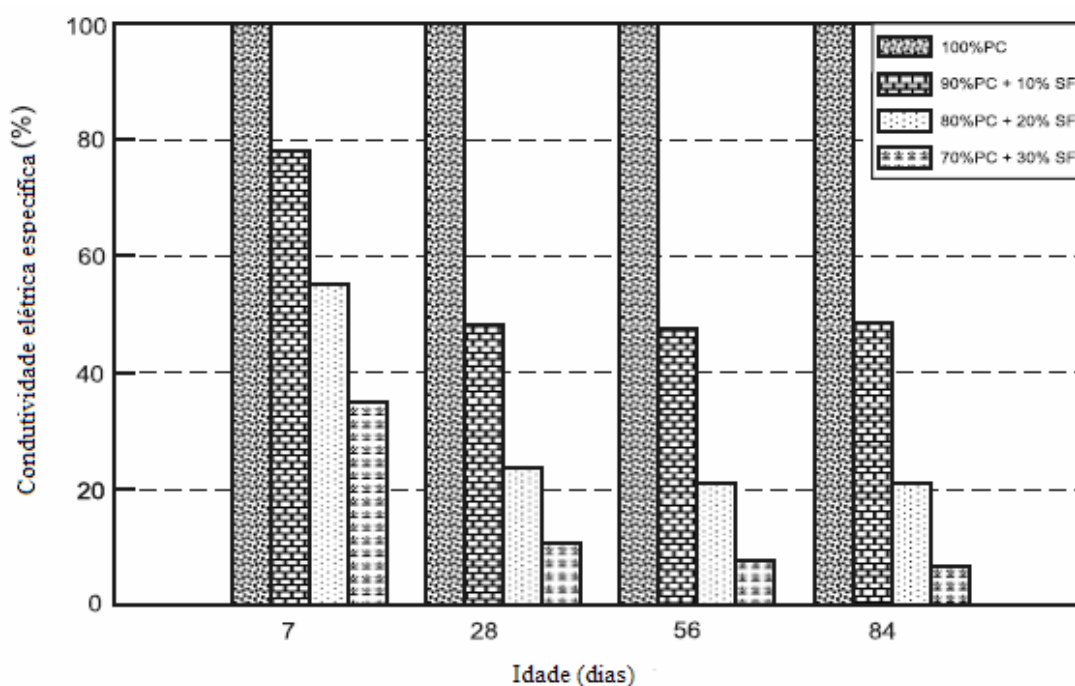
**Figura 17: Relação entre a condutividade do fluido dos poros e a temperatura.**

Fonte: Fonte: McCarter; Starrs; Chrisp (2000)

<sup>11</sup> Arrhenius sugeriu que, em determinadas substâncias, o mecanismo de condução elétrica ocorria devido a migração de íons e não de elétrons, como nos condutores metálicos.

Ao trabalhar com dados de condutividades e resistividades de materiais cimentícios, e inferir outras propriedades a partir destes, algumas ressalvas precisam ser feitas. Shi (2004), considerando que a resistividade do concreto depende das características da estrutura de seus poros e da solução química dentro do seu poro, calculou o efeito da composição do cimento, da reposição de cimento por outros materiais e do agregado, na condutividade de argamassas e concretos através de modelos matemáticos, utilizando os dados dos estudos de Page; Vennesland (1983) e Duchesene; Berube (1994). Para o autor, todos os três fatores influem consideravelmente na resistividade dos materiais e na química da solução dos poros.

Segundo Duchesene, Berube (1994) apud Shi (2004), quando um material com baixo teor alcalino é incorporado, ele incorpora mais alcalinidade do que libera para a solução do poro, tornando esta menos alcalina. É o que acontece quando se incorpora sílica ativa em pastas de cimento. A figura 18 mostra que a condutividade diminui com o aumento do teor de sílica, em substituição ao cimento, ou seja, com a redução da alcalinidade da solução do poro.



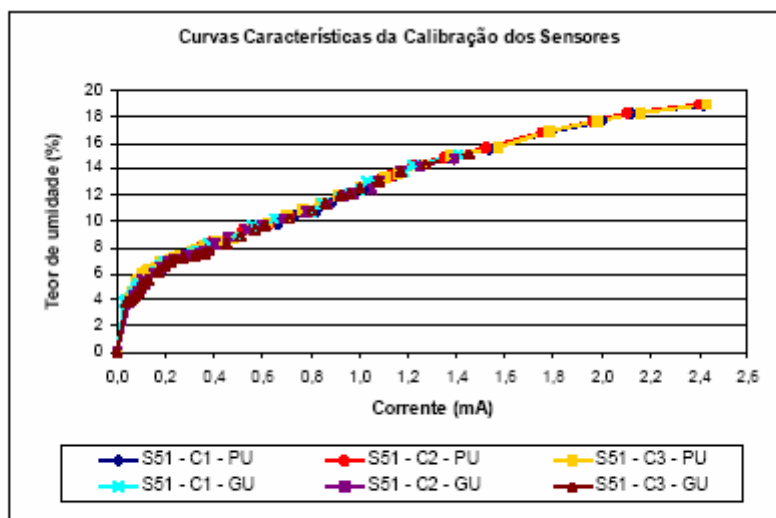
**Figura 18: Efeito do conteúdo da sílica- fume na condutividade relativa de pastas de cimento a diferentes idades, calculada com base nos dados de Page; Vennesland (1983)**

Fonte: Shi (2004)

Quanto à presença de agregados, segundo Shi (2004), estes podem liberar íon alcalino para a solução dos poros, aumentando a condutividade elétrica. Entretanto, de acordo com Shi (2004), a relação entre o volume de agregados e da pasta também influencia a condutividade. A condutividade elétrica de concretos e argamassas, a uma

dada idade, é inversamente proporcional ao volume da fração de agregado. Ela diminui com o aumento de agregado para uma mesma relação a/c.

Paes (2004) mediu a corrente elétrica de pequenos sensores, com teores de umidade crescente. Desta forma a autora obteve uma curva de calibração relacionando a corrente elétrica medida e a presença de umidade (figura 19).



S51 C1 PU – Sensor 51 - Ciclo 1 – Perdendo Umidade; S51 C1 GU – Sensor 51 - Ciclo 1 – Ganhando Umidade.  
 S51 C2 PU – Sensor 51 - Ciclo 2 – Perdendo Umidade; S51 C2 GU – Sensor 51 - Ciclo 2 – Ganhando Umidade.  
 S51 C3 PU – Sensor 51 - Ciclo 3 – Perdendo Umidade; S51 C3 GU – Sensor 51 - Ciclo 3 – Ganhando Umidade.

**Figura 19: Curvas características da calibração dos sensores.**

Fonte: Paes (2004)

Os sensores foram fixados em argamassas de revestimento, para avaliar o transporte de água da argamassa para o substrato, através da medição da corrente elétrica. Conhecidas as resistências, a autora conseguiu determinar o teor de umidade da região da argamassa onde os sensores estavam inseridos. Foi utilizado um valor baixo de corrente (5V) para evitar alteração no sistema.

Cada sensor consistiu de um anel de pvc, preenchido com argamassa, onde foram fixados 2 eletrodos, por onde foi passada a corrente elétrica.

### 2.3.6 Absorção de água

Esta propriedade consiste na quantidade máxima de água que um material poroso consegue absorver, em relação a sua massa seca, em porcentagem. A absorção de água de um material é igual à sua porosidade aberta e é obtido por imersão em água até constância de massa.

Kasemchaisiri; Tangtermsirikul (2007) determinaram a absorção de água de areia de rio e de dois tipos de cinza pesada pelo método do cone. Para a areia de rio, o método

funcionou perfeitamente. Foi encontrada uma absorção de 0,7% para este material. Porém, nos ensaios com a cinza pesada, os resultados não foram satisfatórios. As amostras continuavam mantendo a forma do molde, mesmo quando já apresentavam uma aparência bastante seca. Em função disso, as cinzas pesadas apresentaram valores médios de absorção baixos (14,3% e 3,5%). O ensaio foi repetido quatro vezes por diferentes pessoas e os resultados variaram consideravelmente nas quatro determinações.

Para os autores, isto se deveu à alta porosidade e forma irregular dos agregados, que aumentou o atrito entre as partículas e dificultou a determinação de sua absorção real.

O método do cone utilizado para medir a absorção de água dos agregados miúdos consiste em submeter uma amostra saturada desse material a uma corrente de ar. Em seguida essa amostra é confinada dentro de um cone. Considera-se que o material está na condição de saturado superfície seca quando, após a retirada do cone, o material desmorona. Um grão é considerado na condição saturado superfície seca quando há água apenas no seu interior. Entretanto, este método se mostra insatisfatório para determinar a absorção dos grãos de agregados finos muito porosos como a cinza pesada.

Quanto aos agregados reciclados de construção e demolição, estes também apresentam valores de absorção superiores aos dos agregados naturais. Os agregados reciclados avaliados por Bavaresco (2001) absorveram quase 75% a mais de água que a areia natural.

Segundo Bazuco (1999), que estudou agregados reciclados fabricados pela britagem de concreto confeccionado, quanto maior a quantidade de argamassa aderida, maior será a absorção dos agregados reciclados e a quantidade de argamassa aderida às partículas de AGR é maior para aquelas de dimensões menores. Isto se deve ao fato de os agregados miúdos terem uma maior área específica disponível a ser envolvida pela argamassa.

Os agregados reciclados miúdos mistos analisados por Buyle-Bodin e Hadjieva-Zaharieva (2002) apresentaram absorção de 12%.

A absorção do agregado reciclado varia, ainda, conforme sua composição. Khatib (2005) avaliou a absorção de agregados natural, reciclado de tijolo cerâmico e de concreto. A absorção do agregado reciclado cerâmico foi de 14,75% enquanto que o reciclado de concreto respondeu com 6,25%. O agregado natural foi o material com menor absorção (0,8%).

Corinaldese e Moriconi (2008) também encontraram um valor maior de absorção para os agregados reciclados de tijolos (tabela 3).

**Tabela 3: Características físicas dos agregados.**

Tipo de agregado	REF	REC	BRI	CON
Massa específica ( $\text{kg/m}^3$ )	2.59	2.29	2.06	2.38
Absorção de água (%)	3.1	8.8	16.2	7.1
Fração passante na malha 150 $\mu\text{m}$ (%)	10	8	20	10
Finura de blaine da fração passante na malha 150- $\mu\text{m}$ ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	0.145	0.793	0.493	0.642

Legenda: REF = Referência, REC= agregado misto, BRI= agregado de tijolo, CON= agregado de concreto  
Fonte: Adaptado de Corinaldese e Moriconi (2008)

A absorção do reciclado é maior quanto maior for a porosidade dos componentes do resíduo. Assim, agregados obtidos da reciclagem de alvenaria apresentam taxas de absorção maiores que os obtidos da reciclagem de concreto (LIMA, 1999).

Em materiais cimentícios, nas argamassas de Lenzi (2001), de cimento cal e areia, a absorção de água aumentou com o aumento do teor de cinza pesada, em substituição à areia. Nas misturas com 100% de substituição, houve um acréscimo de 20% na absorção do material. Esta tendência também foi verificada por Santos (2006), que substituiu a areia por cinza pesada em teores de 50% e 100%, em argamassas de cimento, cal e areia.

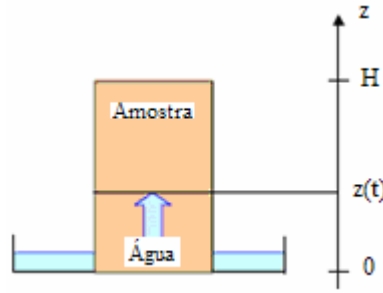
O transporte de água em materiais porosos é fortemente influenciado pela absorção de água dos grãos, uma vez que a quantidade de água final absorvida e o potencial de sucção são influenciados por essa propriedade. Quanto maior a absorção de água do grão, maior a sucção e a quantidade de água absorvida no meio poroso.

### 2.3.7 Absorção capilar

A absorção capilar é o parâmetro mais indicado para estudar o transporte de água quando o material não está saturado.

Segundo Laurent (2001) o teste de absorção de água por capilaridade caracteriza a habilidade de um material de absorver água e consiste em embeber a parte inferior de uma amostra (figura 20) para que a água penetre em seus poros por capilaridade.





**Figura 20: Aparelho para medição de absorção**  
 Fonte: Adaptado de Laurent (2001)

Durante o teste a frente de molhagem  $Z$  e o aumento da massa da amostra  $\Delta m$  são monitorados com o respectivo tempo  $t$ . É geralmente observado que ambos são funções lineares da  $\sqrt{t}$ .

As equações 27 e 28, deduzidas a partir das teorias de transporte de umidade, permitem determinar os coeficientes de sorptividade e capilaridade, respectivamente em um escoamento unidirecional.

$$Va/A = \rho_w \pi r^2 z(t) = \rho_w \pi r^2 \sqrt{r\sigma/2\mu} t = S \sqrt{t} \quad \text{Eq. (27)}$$

$$Z(t) = \sqrt{\frac{r\sigma}{2\mu} t} \quad \text{Eq. (28)}$$

Onde:

$V_a$  = volume de água absorvido

$A$  = área da secção transversal exposta à água

$\rho_w$  = Massa específica;

$r$  = Raio do poro;

$Z$  = altura da mancha;

$\sigma$  = Tensão superficial;

$\mu$  = Viscosidade dinâmica do fluido ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ );

$S$  = Sorptividade.

A equação 27 é conhecida como a equação de Washburn.

Na prática, no ensaio, o coeficiente de absorção da água ou sorptividade  $S$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$ ] é dado pela inclinação de  $m$  ( $\sqrt{t}$ ), dividida pela área da secção da amostra, podendo ser descrita por:

$$i = S \times \sqrt{t} \quad \text{Eq. (29)}$$

Outro parâmetro, o coeficiente de capilaridade  $k$ , dá a profundidade de penetração do líquido e é determinado por:

$$Z = K \times \sqrt{t} \quad \text{Eq. (30)}$$

Onde:

i = volume absorvido por área de secção do corpo de prova

S = coeficiente de sorptividade

Z = altura da mancha

K = coeficiente de capilaridade

Hanzic e Ilic (2003) tentando relacionar os coeficientes de capilaridade e sorptividade, medidos em amostras de concreto de relação a/c igual a 0,5 e traço de 1: 3: 0,5 (cimento, agregado e água), entenderam que, embora haja uma dependência linear entre a capilaridade e a sorptividade, o fator da correlação depende fortemente da combinação das fases líquidas e sólidas. Se dois materiais em combinação com determinado líquido tiverem a sorptividade similar, não significa que, necessariamente, terão capilaridade similar e vice versa.

Martys; Ferraris (1997) avaliaram a absorção capilar de concretos e duas argamassas de traços 1: 2,75:0,485 e 1:1.4:0,29 ( cimento: areia: a/c) e tamanho máximo de agregado de 2 mm, no período de um ano. Em quase todos os casos verificou-se que a água absorvida foi proporcional à  $t^{1/2}$  durante curtos períodos. Para períodos superiores a um dia, houve uma clara distância da tendência de comportamento  $t^{1/2}$ , sendo que a taxa de sorção diminuiu.(MARTYS; FERRARIS, 1997).

Para os autores, a diminuição da taxa de sorção pode ser devido à presença de poros menores, no caminho da água, que desaceleram a absorção; pela maior porosidade da zona de transição, no caso de concretos, que diminui a velocidade da absorção; ou quando o menisco do poro se estabiliza e a o transporte passa a ser controlado pelo transporte de capilaridade nos poros de gel ou por difusão da umidade.

Considerando uma sorção inicial diferente, em função do contato da água com a face da amostra, e levando em consideração a interação que pode existir entre a água e o concreto em ensaios a longo prazo, Martys; Ferraris (1997) chegaram a:

$$V/A = C (-S_g \sqrt{t} + C_m (1 - \exp(-S \sqrt{t}/C_m))) \quad \text{Eq. (31)}$$

Onde:

C=  $V/A_o + \rho A$

V/Ao = volume de água absorvido pela área de secção transversal, devido à absorção inicial;

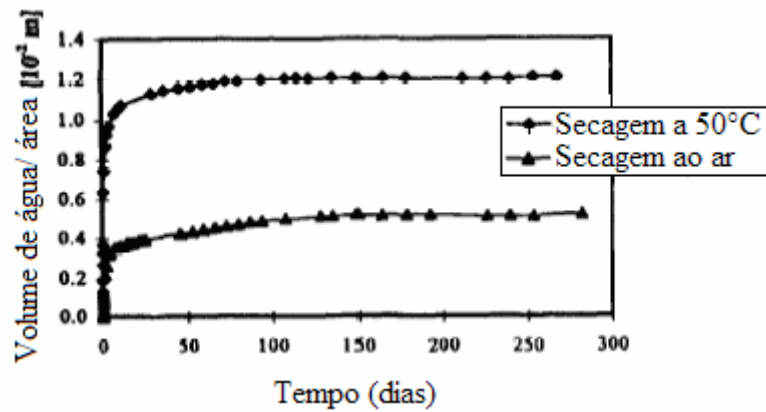
$\rho$  = massa específica líquido;

A= Área de secção transversal;

$S_g$  = sucção dos poros menores, o efeito da difusão da umidade;

$C_m$  = Constante obtida experimentalmente;

As sorptividades das argamassas de Martys, Ferraris (1997) também foram avaliadas quanto ao grau de saturação das amostras. Para tanto, dois procedimentos de secagem foram utilizados: secagem a 50°C, até constância de massa e secagem ao ar durante quatro dias, a 20°C e umidade relativa de 30%. A influência do grau de saturação na absorção de água foi observada. Para um período de cerca de 100 dias, as amostras secas a 50°C absorveram cerca de 3 vezes mais água que as outras. E a sorptividade dessas amostras foi três vezes maior que as sorptividades das argamassas secas a 20°C (figura 21).



**Figura 21: Influência do tratamento nas amostras na absorção capilar.**

Fonte: Martys; Ferraris (1997).

Wilson; Taylor (1998) consideraram a dificuldade em obter um escoamento unidimensional em medições realizadas em campo e determinaram a sorção considerando um escoamento elipsóide:

$$M(t) = \rho A \left( \sqrt{\frac{\pi}{3}} S t^{1/2} + \frac{7}{8\sqrt{3}} \cdot \frac{S^3 \pi^{3/2}}{\phi^2 Li^2} t^{3/2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{147}{128} \cdot \frac{S^5 \pi^{5/2}}{\phi^4 Li^4} t^{5/2} \right) \quad \text{Eq. (32)}$$

Onde:

$M(t)$  = Ganho de massa da amostra em um instante  $t$ ;

$\rho$  = Densidade do líquido;

$A$  = Área de secção transversal;

$\phi$  = Porosidade;

$Li$  = diâmetro da franja de infiltração;

$t$  = Tempo;

$S$  = Sorptividade;

Nambiar; Ramamurthy (2007) mediram a absorção de água de concretos espumosos<sup>12</sup> com e sem adição de cinza volante, aumentando a porcentagem de espuma inserida. Com o aumento da espuma e, por conseguinte, de bolhas de ar (poros não conectados), o conteúdo de pasta diminuiu, diminuindo também o conteúdo de poros capilares. Os concretos com maior adição de espuma (tanto nas misturas com e sem cinza) apresentaram menor absorção, ainda que com o aumento da porosidade, o que reforça que a absorção de água se dá pelos poros capilares, não tendo ligação somente com a porosidade, mas também com a presença de poros capilares e sua conectividade.

Segundo Nambiar; Ramamurthy (2007), observações similares da influência do volume de pasta na absorção de água foram observadas por Kolias; Georgiou (2005).

Andrade (2004) estudou argamassas de concreto e cinza pesada, com traço 1:3:0,6 (cimento: areia: a/c) e cimento CPV-ARI 32, com substituição de 25% a 100% do teor de areia por cinza pesada. Na argamassa, cuja relação a/c e a quantidade cinza pesada na mistura, foram corrigidas em função da umidade presente no material, o autor encontrou valores maiores de sorptividade para as misturas com maiores teores de CzP. Para a argamassa com 100% de CzP, o coeficiente de sorptividade foi de  $7,4 \text{ kg/m}^2/\text{h}^{1/2}$ .

Lenzi (2001) no seu estudo com argamassas (mencionado anteriormente) com substituição da areia por cinza pesada, observou que a presença da cinza nas argamassas aumentou sua absorção por capilaridade, e que este acréscimo, aumenta com o teor de CzP. A mistura com substituição de 100% da areia por cinza pesada registrou aumento na absorção de aproximadamente 100% , quando comparada à mistura com 100% de areia.

Santos (2006) também observou um maior conteúdo de água absorvido para as argamassas com cinza pesada e explica isto em função da maior porosidade aberta, obtida com o uso das cinzas.

Considerando que as propriedades hidrodinâmicas de concretos e argamassas são função, também, das propriedades dos seus constituintes, estudos recentes vêm analisando o comportamento do composto granular utilizado nessas misturas.

Andrade, Rocha e Cheriaf (2007) na avaliação com misturas granulares de areia natural e cinza pesada (citada anteriormente), observaram que o conteúdo de água absorvida capilarmente pela cinza é muito maior que o da areia, e que isto se evidencia ainda mais quanto maior for a quantidade de cinza na mistura.

---

<sup>12</sup> Concretos com aditivos promotores de espuma.

Segundo os autores, o aumento na porosidade, consequência do aumento da quantidade de cinza, representa um maior potencial de absorção capilar, relacionando direta e fortemente a quantidade de cinza e o potencial de absorção. Vale lembrar que a absorção dos grãos da cinza pesada contribui para o aumento do potencial de sucção das misturas com cinza.

Para amostras com 100% de cinza pesada, o índice de absorção alcançou 85% a mais que os valores da amostra de referência com 100% de areia (tabela 4).

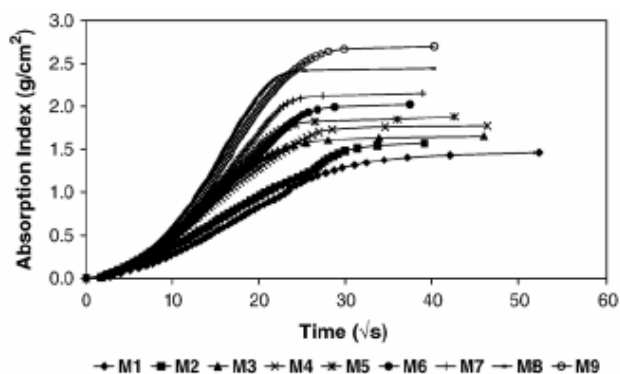
**Tabela 4: Composições de areia natural e cinza pesada.**

Composição de areia natural e cinza pesada										
Amostra	Material (% em massa)		Material (% em volume)		Umidade final da mistura(%)	m. unit. (kg/cm²)	m. esp. (kg/cm³)	Porosidade	Sorptividade g/cm²/√s	Máximo ganho de água (g)
	Areia	CzP	Areia	CzP						
M1	100.0	0.0	100.0	0.0	21.3	1.515	2.634	0.425	0.058	121
M2	96.2	3.8	90.7	9.3	25.5	1.418	2.573	0.449	0.059	130
M3	91.6	8.4	81.0	19.0	29.7	1.322	2.508	0.473	0.058	136
M4	85.9	14.1	70.4	29.6	33.8	1.235	2.467	0.500	0.079	146
M5	80.8	19.2	62.1	37.9	39.0	1.126	2.405	0.532	0.106	155
M6	74.1	25.9	52.7	47.3	46.1	1.023	2.308	0.557	0.103	167
M7	64.4	35.6	41.4	58.6	54.4	0.941	2.232	0.579	0.126	178
M8	39.1	60.9	20.1	79.9	75.0	0.774	2.066	0.625	0.165	202
M9	0.0	100.0	0.0	100.0	82.0	0.591	1.814	0.674	0.158	223

Fonte: Adaptado de Andrade, Rocha e Cheriaf (2007).

Visto que as amostras com cinzas tendem a formar sistemas com altos índices de absorção e com altas taxas de absorção, o coeficiente de sorptividade aumenta significativamente quando o conteúdo de cinza aumenta. Isto significa que o sistema que contem cinza pesada absorve, através da capilaridade, maiores quantidades do líquido (índice mais elevado de absorção final) em menos tempo (taxa mais elevada de absorção) e podem alcançar resultados duas a três vezes maiores do que aqueles para a amostra natural da areia (ANDRADE; ROCHA; CHERIAF, 2007).

A cinética das misturas também é visivelmente alterada, com o aumento do ter de incorporação de cinza pesada (figura 22). A inclinação da curva de absorção fica maior e mais rápida é a velocidade de absorção.



**Figura 22: Absorção de água por unidade de área versus a raiz do tempo.**

Fonte: Adaptado de Andrade, Rocha e Cheriaf (2007).

### 2.3.8 Ângulo de molhamento aparente

O ângulo de molhamento entre o líquido dentro de um poro capilar e a parede desse poro pode ser encontrado através de ensaios de absorção capilar a água e a álcool, no material poroso. As inclinações das retas dos gráficos de absorção por área em função da raiz do tempo são utilizadas na equação 33, definida por Bornemiza (1964) apud Merouani (1987).

$$\cos \alpha_e = (Se/Sa)^2 \frac{\mu l \times \sigma a}{\mu a \times \sigma l} \quad \text{Eq. (33)}$$

Onde:

$\alpha_e$  = ângulo de molhamento aparente

$Se$  = Inclinação da reta (gráfico de absorção a água)

$Sa$  = Inclinação da reta (gráfico de absorção a álcool)

$\mu l$  = Viscosidade dinâmica da água

$\mu a$  = Viscosidade dinâmica do álcool

$\sigma l$  = Tensão superficial água- ar

$\sigma a$  = Tensão superficial álcool- ar

A tabela 5 apresenta a tensão superficial e a viscosidade dinâmica do ar e do álcool a 20°C.

**Tabela 5: Propriedades da água e do álcool a 20°C**

Líquido	Tensão superficial líquido-ar (N/m)	Viscosidade dinâmica (N.s/m <sup>2</sup> )
Água	0,0728	1,003 x 10 <sup>-3</sup>
Álcool	0,0230	1,2 x 10 <sup>-3</sup>

Segundo Capulto (1988) quanto maior a temperatura menor será a viscosidade da água, podendo esta escoar com mais facilidade.

Segundo Helmholtz apud Capulto (1988), a viscosidade da água em função da temperatura é dada pela fórmula empírica:

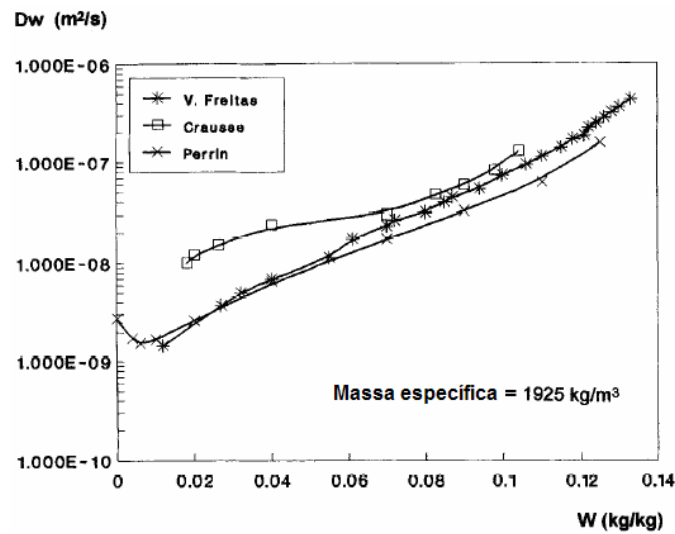
$$\mu = \frac{0,0178}{1 + 0,033T + 0,00022T^2} \quad \text{Eq. (34)}$$

Por ser uma medida indireta, a partir da sorptividade do material a dois líquidos, o ângulo de molhamento medido é um ângulo de molhamento aparente.

### 2.3.9 Difusividade hídrica

A difusividade hídrica é uma propriedade hidrodinâmica muito importante no entendimento do transporte de água no meio poroso insaturado.

Segundo De Freitas; Abrantes; Crausse (1996), este parâmetro é fundamental nas equações de transferência de umidade e varia com a temperatura e com o conteúdo de umidade. Os autores avaliaram a variação da difusividade hídrica em função do conteúdo de umidade de tijolos, (figura 23) e perceberam aumento no valor da difusividade à medida que o conteúdo de umidade crescia.



**Figura 23: Coeficiente de difusividade de umidade (Dw) de Tijolos.**

Fonte: De Freitas; Abrantes; Crausse. (1996).

Para Oh; Jang (2004) a difusividade hídrica do material poroso depende fortemente de aspectos de sua microestrutura como a tortuosidade e a interconectividade do sistema de poros. Segundo o autor, a difusividade do meio Q, encontrada na relação de Nernst-Einstein, pode ser descrita como:

$$Q = \Phi_{cap} \beta \quad \text{Eq. (35)}$$

Onde:

$\Phi_{cap}$  = Porosidade capilar  
 $\beta$  = Parâmetro da estrutura do poro

McCarter; Starrs; Chrisp (2000) usaram a relação de Nernst-Einstein, para relacionar a condutividade elétrica com a difusividade hídrica do material. Quando aplicada para materiais cimentícios, a relação é descrita pela equação 36:

$$\frac{\sigma_{meio}}{\sigma_{poro}} \approx \frac{D_{eff}}{D_o} = Q \quad \text{Eq. (36)}$$

Onde:

$\sigma_{\text{meio}}$  = Condutividade elétrica do meio mássico

$\sigma_{\text{poro}}$  = Condutividade elétrica do poro fluido

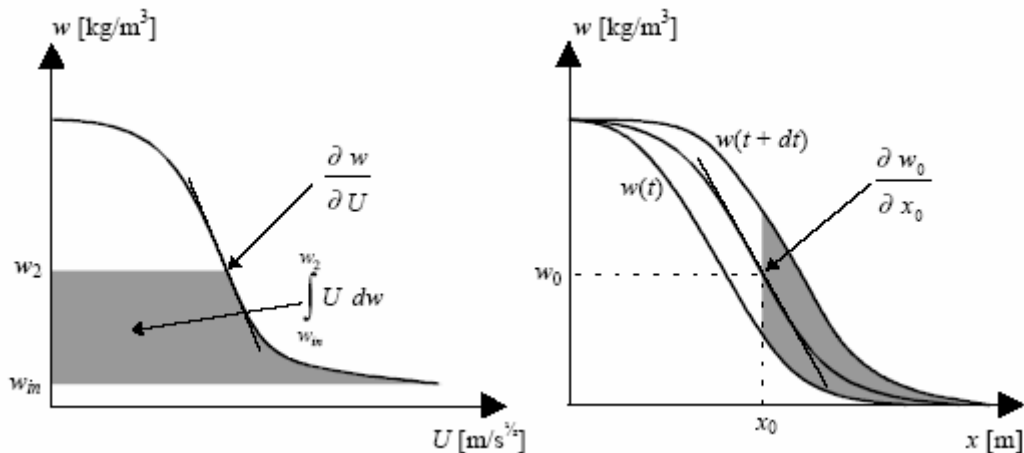
$D_0$  = Difusividade das espécies em diluição infinita

$D_{\text{eff}}$  = Difusividade efetiva das mesmas espécies dentro da argamassa

$Q$  = Difusividade no meio

Segundo Janz (1997), em materiais com poros muito pequenos, (menores que 50nm) a adsorção de vapor é suficiente para determinar a difusividade hídrica, pois estes materiais chegam a uma saturação quase completa, com uma umidade relativa de 98%. Entretanto para materiais com poros maiores, a adsorção precisa ser complementada com outro método, pois, mesmo a umidades relativas extremamente altas (próximas a 100%), estes materiais conseguem chegar a um grau de saturação capilar muito baixo (inferiores a 10%). Neste caso, as isotermas de sorção precisam ser complementadas pela curva de retenção de água.

A difusividade hídrica é calculada utilizando-se a transformada de Boltzmann. Outro método para determinar a difusividade, é o método do perfil, onde perfis de umidade são identificados e a difusividade é encontrada como função da média da curva de dois perfis de umidade medidos. A figura 24 ilustra a diferença entre os métodos:



**Figura 24: Princípio do método de Boltzmann (à esquerda) e do método do perfil (à direita).**

Fonte: Janz (1997)

Vários são os métodos para determinar a difusividade hídrica de materiais com altos teores de umidade, baseados nos perfis de umidade, durante a absorção de água ou durante sua redistribuição, quando a absorção é finda.

- Método de secagem e peso das amostras

Neste método amostras saturadas são fatiadas e submetidas a secagem e o conteúdo de massa de água nas fatias da amostra é determinado por perda de massa. É



um procedimento exato, pois a quantidade de água na amostra pode ser mensurada. Entretanto, é um método destrutivo, que requer um grande número de amostras e só pode ser realizado com fluidos não voláteis. Outro inconveniente do método é que, ao fatiar as amostras, forma-se um material pulverulento, que pode obstruir os poros.

- Tomografia computadorizada

É um método não destrutivo que consiste em medir a perda de um feixe de Raios X que passam pela amostra. Tendo definidos o valor da absorção dos feixes na água e no ar como 0 e -1000, respectivamente e conhecendo o valor de absorção dos feixes na amostra, a diferença de valor entre a absorção do ar e da água é um indicador do teor de água no material.

- Microondas

Outro método não destrutivo utiliza microondas e mede a atenuação de um feixe de microondas quando este é passado pela amostra. Esta atenuação é influenciada pela constante dielétrica do material, que é menor que a constante dielétrica da água. A intensidade da atenuação corresponde ao teor de água da amostra. Entretanto, a intensidade do feixe das microondas quando muito elevada, aumenta a temperatura da água e provoca migração de umidade devida ao gradiente de temperatura.

- Atenuação de raios gama

Neste método, são usados raios gama, que interagem com a órbita dos elétrons no material e são absorvidos ou dispersados. A amostra em análise é colocada entre a fonte de raios gama e um detector. É um método não destrutivo, com boa precisão, mas muito caro e exige cuidados especiais, pois a fonte de liberação dos raios é radioativa.

- Radiografia com Nêutrons

Semelhante à atenuação de raios gama, a radiografia com nêutrons se utiliza da interação entre os nêutrons com os núcleos de hidrogênio. A atenuação do feixe de nêutrons é relacionada com o conteúdo total de água no material. A amostra também é colocada entre a fonte de nêutrons e o conversor. Sua imagem é registrada em um filme radiográfico junto ao receptor e é formada indiretamente pelos nêutrons que atravessam o objeto e interagem com o conversor. Também é um método não destrutivo, mas também utiliza radiação e necessita de testes de segurança e técnicos treinados.

- Ressonância nuclear magnética

A difusividade hídrica é igualmente determinada com a ressonância nuclear magnética. Técnica não destrutiva, que não utiliza radiação, mas muito cara.

Consiste em medir a energia absorvida quando um campo eletromagnético é aplicado perpendicularmente ao campo magnético constante na amostra. A quantidade de energia absorvida é proporcional ao número de núcleos de hidrogênio no volume medido. Considerando que a água se encontra em forma de núcleos de hidrogênio, mede-se a água contida no material. Além de água, o método é adequado para todos os fluidos com átomos de hidrogênio.

- Condutividade térmica

A condutividade térmica dos materiais pode ser utilizada para inferir sua difusividade hídrica. Sendo esta propriedade sensível à presença de água, ela aumentará com o aumento do teor de umidade. Se a relação entre o teor de umidade e a condutividade térmica é conhecida, o teor de umidade pode ser medido.

- Métodos elétricos

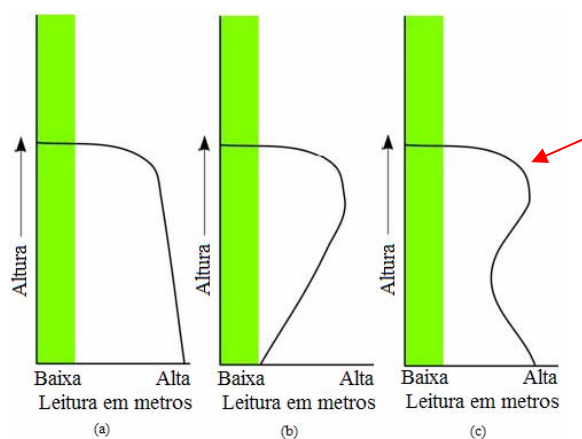
Outro método, o elétrico, é baseado na medição da variação da resistência elétrica em função do aumento dinâmico do teor de umidade. A resistência elétrica é medida entre dois eletrodos em contato direto com o material. Para relacioná-la com o teor de água presente na amostra, a resistência elétrica de uma amostra do mesmo material é determinada para diferentes teores de umidade conhecidos. A curva que relaciona os valores de resistência medidos aos teores de umidade determinados é chamada curva de calibração.

É um método não destrutivo e barato, entretanto a resistência elétrica do material é influenciada por outros fatores como sais, temperatura e massa específica. De acordo com Wormald et al. (1969) apud Janz (1997), a resistência elétrica de um concreto, com a mesma quantidade de água interna pode variar mais de 40% devido a mudanças de concentração de sais nos poros de água. Segundo Janz (1997), o uso desse método, quando o teor de sais varia, é limitado.

Para Coleman (1997), a resistividade medida é sensível a quantidades muito pequenas de umidade. Umidades inferiores a 0,1% já podem ser registradas pelas medições. Ainda, a resistividade medida pode ser mais alta se os eletrodos forem inseridos dentro dos materiais. Entretanto, a resistividade também é sensível à presença de certos tipos de sais solúveis. Mesmo em baixas concentrações, a presença dos sais já pode ser detectada pela resistividade. Para o autor, é importante então considerar que, quando as leituras de resistividade registrarem zero, que significa umidade zero, é porque a amostra está seca e descontaminada.

Coleman (1997) avaliou paredes e interpretou padrões gerais típicos de perfis de umidade que podem ser encontrados sob uma superfície, em alturas crescentes. A figura 25 apresenta alguns desses padrões, onde:

- a) Padrão com leituras iniciais elevadas (de umidade), em declínio suave, com um corte brusco. Típico de umidade ascendente ativa;
- b) Pouca umidade na base, “aumentando” com a altura e subitamente interrompida. Indica umidade ascendente controlada (parada). O aumento da leitura reflete, na verdade, o acréscimo da presença de sais até um valor máximo. Este padrão é, às vezes, erroneamente interpretado como umidade descendente;
- c) Umidade elevada na base, ascendente e parcialmente controlada, que diminui com a altura. A água ainda sobe, mas somente na parte mais baixa da parede. A presença de sais aumenta mais acima, provocando leituras elevadas que podem ser obtidas especialmente na “faixa salgada”, indicada pela seta vermelha. Erroneamente, é interpretado como uma combinação de umidade ascendente com umidade descendente penetrante.



**Figura 25: Padrões gerais típicos de umidade**

Fonte: Adaptado de Coleman (1997)

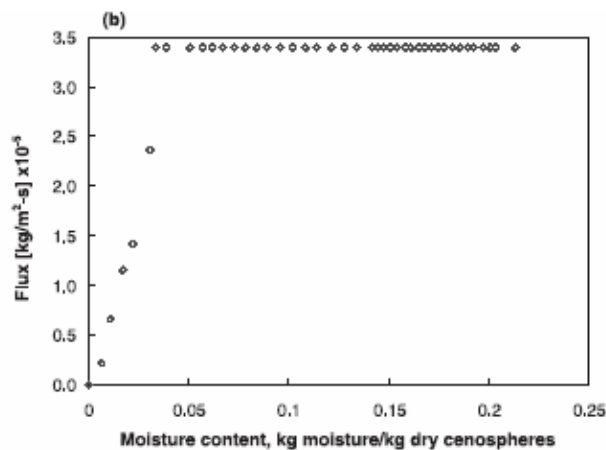
O uso de medidas elétricas para avaliar a presença e o perfil de umidade em materiais porosos é válido. Entretanto, é preciso que os perfis adquiridos sejam adequadamente interpretados. Ensaio complementares podem ser necessários, como ensaios para determinar a resistência no fluido dos poros e a presença de sais no material.

### 2.3.10 Cinética de secagem ao ar

A cinética de secagem consiste na perda de água do material quando exposto às condições de umidade relativa e temperatura ambiente ao longo do tempo e é uma propriedade importante nas argamassas, considerando que a presença de água em seu interior favorece o aparecimento de patologias como a presença de bolor e mofo.

Barbare, Shukla e Bose (2003) compararam a secagem ao ar (a 23°C, 30°C e 40°C e UR de 45%) de concretos saturados normais e com cenosferas e observaram que o concreto com cenosferas secou mais devagar do que o concreto normal e seu conteúdo de umidade de equilíbrio foi maior.

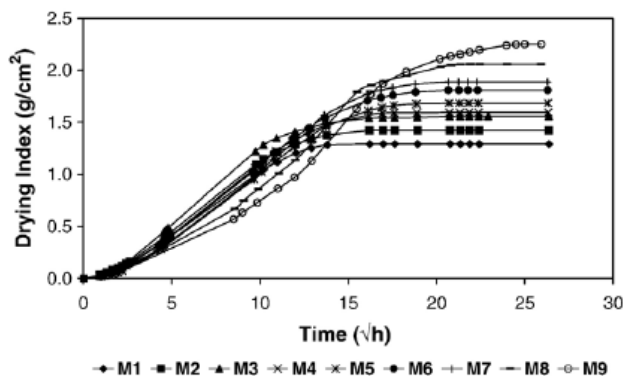
Na secagem, as cenosferas e os grãos de areia mostraram um comportamento clássico de uma taxa constante de secagem, seguida por uma queda linear de sua taxa.



**Figura 26: Fluxo de secagem versus conteúdo de umidade de cenosferas**

Fonte: Barbare, Shukla e Bose (2003).

Foi observado no composto granular de cinza e areia de Andrade, Rocha e Cheriaf (2007) que na secagem ao ar, assim como na absorção capilar, a perda de água é fortemente influenciada pela quantidade de cinza. Quanto mais cinza, maior o consumo de água e consequentemente maior a perda, antes do equilíbrio higroscópico. Entretanto a velocidade desta perda nas amostras com cinza não diferiu muito da amostra de referência, como pode ser percebido na figura 27. As inclinações da parte reta da curva de comportamento de secagem, das diferentes misturas, não diferem consideravelmente.



**Figura 27: Perda de massa por unidade de área versus raiz quadrada do tempo**

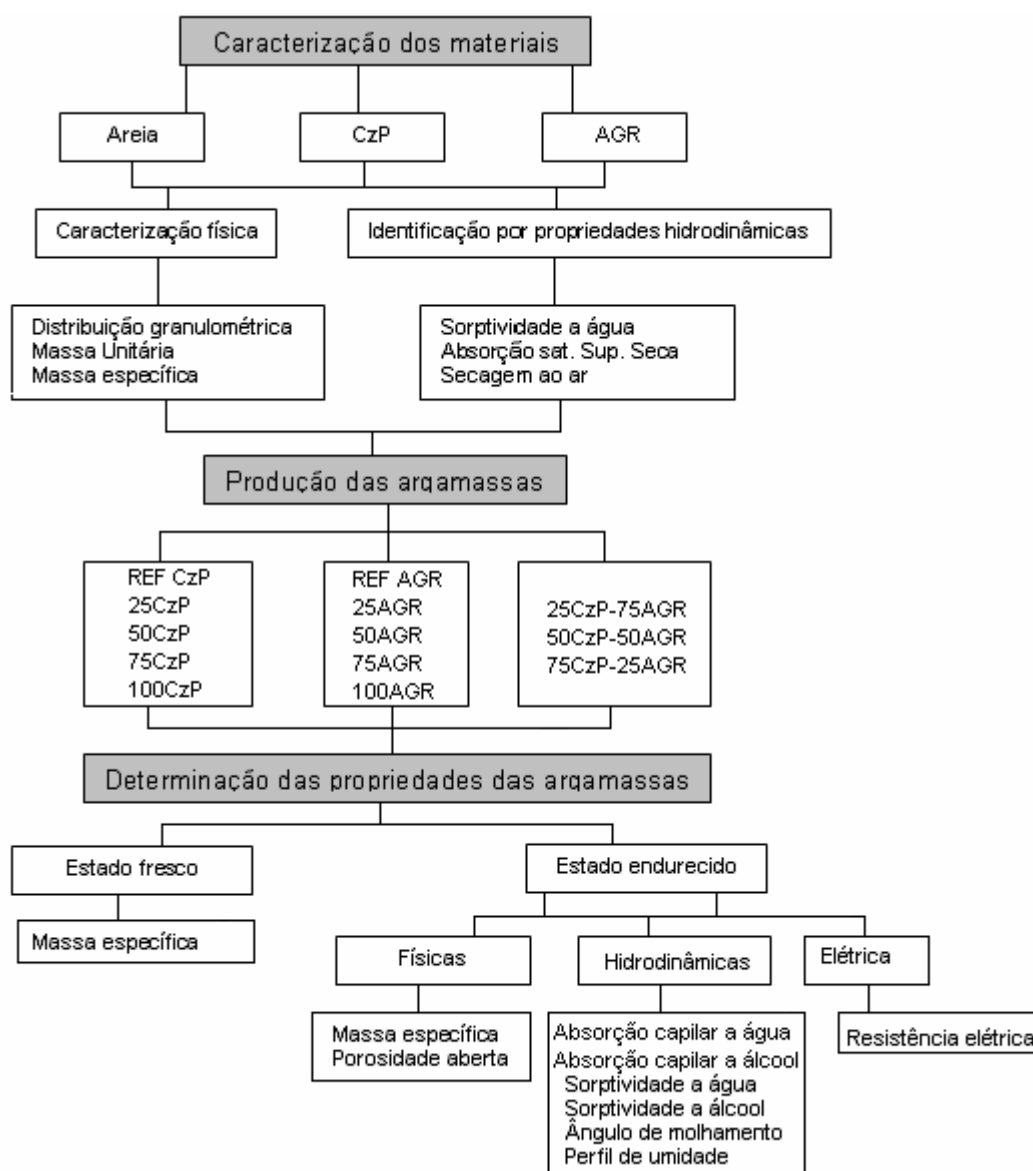
Fonte: Andrade, Rocha e Cheriaf (2007).

Em materiais cimentícios, Santos (2006) observou que suas argamassas com cinza pesada possuíam uma umidade residual após a secagem e que quanto maior o teor de cinza, maior a umidade residual. Também foi observado que elas perdem mais água, mas este fato é devido à maior umidade inicial da argamassa.

Quanto ao fluxo de secagem, a autora observou que quanto maior o teor de cinza pesada, menor o fluxo, principalmente nos tempos iniciais, tendendo a uma pior comunicação entre os poros e que este, em argamassas com cinza, é cerca de  $10^7$  vezes mais lento que o fluxo de absorção de água por capilaridade.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para determinar e avaliar propriedades de transporte de água de materiais granulares e argamassas com cinza pesada e com agregado reciclado de construção e demolição, foi montado o programa experimental esquematizado na figura 28. A seguir são apresentados os materiais utilizados na pesquisa e o detalhamento das etapas do programa experimental e dos métodos de ensaios.



**Figura 28: Esquema geral do programa experimental**

A primeira etapa da pesquisa consistiu na caracterização dos materiais utilizados quanto às suas propriedades físicas e hidrodinâmicas. Esta caracterização teve o intuito de classificar a CzP e o AGR em faixas de comportamento hidrodinâmico e analisar o efeito das características dos materiais granulares na matriz cimentícia.

A faixa granulométrica entre 0,15 - 4,8mm foi adotada na pesquisa para que a igualdade no tamanho dos grãos fosse mantida. Esta escolha deveu-se ao fato de o agregado miúdo utilizado como referência ser encontrado no mercado com diâmetro mínimo de 0,15mm. Também era esperado que, com o uso da mesma granulometria entre os agregados, a estrutura porosa fosse mantida nas misturas com diferentes teores de substituição.

As propriedades físicas avaliadas foram a granulometria, a massa unitária e a massa específica dos materiais granulares. A absorção de água no estado saturado superfície seca, a absorção capilar, a sorptividade e a cinética de secagem ao ar foram as propriedades hidrodinâmicas identificadas.

A absorção de água dos grãos foi medida de acordo com a NBR NM-30 e pelo método do picnômetro, com o propósito de comparar os resultados obtidos nos dois métodos, devido à dificuldade de determinação da absorção de água do grão de CzP.

Na caracterização hidrodinâmica, foram utilizadas misturas granulares entre os resíduos e a areia normal do IPT, com teores de substituição da areia pelos resíduos de 0% a 100%.

No ensaio de absorção capilar de água, o grau e tempo de saturação, a absorção, as velocidades de absorção e as sorptividades foram analisadas. As amostras utilizadas neste ensaio foram reaproveitadas para o ensaio de secagem ao ar.

Em seguida, para avaliar o efeito dos materiais granulares em materiais cimentícios consolidados, argamassas foram produzidas com os resíduos analisados, nos mesmos teores de substituição das misturas granulares. Foram medidas propriedades no estado fresco e no estado endurecido das argamassas.

No estado fresco, a massa específica foi identificada. No estado endurecido, propriedades físicas, hidrodinâmicas e elétricas foram estabelecidas.

As propriedades físicas determinadas no estado endurecido foram a massa específica, a porosidade. Essas propriedades foram medidas para avaliar a influência dos parâmetros físicos nas propriedades hidrodinâmicas das argamassas. As propriedades físicas das argamassas foram relacionadas com as propriedades do material granular.

A sorptividade e o ângulo de molhamento aparente foram medidos pelo ensaio de absorção capilar, feito com água e álcool.

O perfil de umidade das argamassas foi determinada através de medições elétricas em uma amostra submetida a absorção de água por capilaridade. Medidas elétricas também foram utilizadas para determinar a resistência elétrica das argamassas com CzP e AGR com diferentes teores de umidade.

Todos os ensaios foram realizados com amostras, cuja hidratação foi interrompida por secagem em estufa, aos 28 dias.

### 3.1 Materiais utilizados

#### 3.1.1 Cimento

O cimento foi escolhido com base na necessidade de um aglomerante sem adições que pudessem superestimar possíveis reações pozolânicas da Cinza Pesada. Para tanto, foi utilizado Cimento Portland do tipo CP-I-S, classe 32, livre de adições não inertes. A caracterização do lote de cimento foi especificada pelo fabricante e é dada na tabela 6. Sua massa específica é de 3,12g/cm<sup>3</sup>.

**Tabela 6: Especificação técnica do cimento CP-I-S 32.**

Ensaio Físico	Unidade	Média	Máximo	Mínimo	Desvio
Peneira 200	%	2,26	3,00	1,30	0,42
Peneira 325	%	14,25	16,50	9,50	2,41
Blaine	cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>	3685	3980	3370	181
Água de consistência normal	%	25,36	25,80	24,80	0,35
Início de pega	horas	02:56	03:10	02:40	0:09
Fim de pega	horas	03:56	04:10	03:40	0:10
Expansão a quente	mm	1,39	2,00	1,00	0,33
Resistência - 1 dia	MPa	19,48	20,70	17,80	1,10
Resistência - 3 dias	MPa	28,27	30,90	25,90	1,46
Resistência - 7 dias	MPa	32,21	34,40	29,10	1,64
Resistência - 28 dias	MPa	x	x	x	x
Ensaio Químico	Unidade	Média	Máximo	Mínimo	Desvio
Perda ao fogo	%	3,46	3,82	3,11	0,21
SiO <sub>2</sub>	%	18,40	18,85	18,01	0,22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	4,51	4,62	4,46	0,06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	3,04	3,09	2,97	0,04
CaO	%	61,51	62,10	61,12	0,32
MgO	%	6,25	6,47	6,09	0,11
K <sub>2</sub> O	%	0,92	0,94	0,88	0,02
Na <sub>2</sub> O	%	0,07	0,07	0,07	0,00
SO <sub>3</sub>	%	3,10	3,35	2,94	0,15
Resíduo insolúvel	%	0,82	1,04	0,58	0,13
CO <sub>2</sub>	%	2,60	2,76	2,41	0,14



### **3.1.2 Agregados miúdos**

#### **3.1.2.1 Areia normal**

O agregado miúdo de referência foi a areia normal produzida pelo IPT e regulamentada pela norma NBR 7214/82. Esta areia foi escolhida por ser um material padronizado, com granulometria normalizada, o que garante sua disponibilidade de uso futuro na continuidade desta pesquisa, mantendo a fidelidade dos resultados.

#### **3.1.2.2 Cinza pesada**

Cinza obtida na esteira da unidade C do Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda, situada no município de Capivari de Baixo em Santa Catarina.

Para uso deste resíduo como agregado miúdo, as frações granulométricas com diâmetro maior que 4,8 mm foram descartadas.

A figura 29 apresenta a CzP utilizada na pesquisa em granulometrias separadas.



**Figura 29: Cinza Pesada.**

#### **3.1.2.3 Agregado reciclado de resíduo de construção e demolição**

Agregado reciclado proveniente de Belo Horizonte e obtido em central única de reciclagem, classificado como agregado miúdo. A figura 30 apresenta o agregado reciclado.



**Figura 30: Agregado reciclado.**

### **3.1.3 Água**

Proveniente da rede de abastecimento local, destilada e deionizada em processo realizado no Laboratório Valores, a fim de evitar a presença de sais.

## **3.2 Métodos**

### **3.2.1 Caracterização física dos agregados.**

Na caracterização física, foram avaliadas duas faixas granulométricas dos agregados CzP e AGR. Uma faixa com agregados de diâmetro  $< 4,8\text{mm}$ , denominados CzP-T e AGR-T e uma segunda faixa com agregados de diâmetro  $< 4,8$  e sem finos, denominados CzP-SF e AGR-SF. Nesta pesquisa, foi considerado como material fino, aquele passante na peneira  $0,15\text{mm}$ .

As referências de areia IPT foram caracterizadas somente na faixa granulométrica escolhida para o estudo ( $4,8 > \varnothing > 0,15\text{ mm}$ ).

#### **3.2.1.1 Composição Granulométrica de acordo com a NBR NM 248:2001.**

Foi realizada a caracterização granulométrica das faixas de CzP e do AGR, citadas acima, em três amostras previamente secas e representativas de cada.

As faixas granulométricas foram identificadas de acordo com os limites das normas NBR 7211/83 e NBR 7211/05 e seus parâmetros de classificação foram determinados.

A partir desse ensaio foram calculados os parâmetros Diâmetro Máximo e Mínimo, Módulo de Finura, Porcentagem de finos, Coeficiente de uniformidade e de curvatura.

O Coeficiente de uniformidade indica a falta de uniformidade, sendo tanto menor quanto mais uniforme for o material, e é calculado por:

$$U = D_{60} / D_{10} \quad \text{Eq.(37)}$$

Onde:

U= Coeficiente de Uniformidade

D60= Diâmetro da peneira onde 60% do material fica retido;

D10= Diâmetro da peneira onde 10% do material fica retido.

O Coeficiente de curvatura indica a graduação do material e é calculado por:

$$CC = (D_{30})^2 / (D_{10} \cdot D_{60}) \quad \text{Eq.(38)}$$

Onde:

CC= Coeficiente de curvatura

D30= Diâmetro da peneira onde 30% do material fica retido;

D60= Diâmetro da peneira onde 60% do material fica retido;

D10= Diâmetro da peneira onde 10% do material fica retido.

### 3.2.1.2 Massa específica pelo processo do picnômetro.

Ensaio realizado nas faixas granulométricas listadas na tabela 7 do AGR, da CzP e de suas respectivas referências para avaliar sua influência nas propriedades hidrodinâmicas. Todos os materiais foram previamente secos. Foram ensaiadas amostras com e sem procedimento de lavagem.

**Tabela 7: Faixas granulométricas do ensaio de massa específica**

Procedimento	Com fervura		Sem fervura	
Materiais	CzP	AGR	REF CZP	REF AGR
Faixa granulométrica	$\emptyset < 4,8$	$\emptyset < 4,8$		
	$4,8 > \emptyset > 0,15$	$4,8 > \emptyset > 0,15$	$4,8 > \emptyset > 0,15$	$4,8 > \emptyset > 0,15$

Em função da maior porosidade da cinza pesada e do AGR, nos ensaios com esses materiais, os picnômetros foram submetidos à fervura com as amostras no seu interior, antes do seu preenchimento total, para retirada do possível ar aprisionado.

### 3.2.1.3 Massa unitária baseada na NBR7251/82.

O ensaio de massa unitária foi baseado na NBR7251/82 e também realizado nos materiais antes e após o procedimento de lavagem, para avaliar a influência dessa propriedade no comportamento hidrodinâmico dos materiais estudados.

Os materiais e faixas granulométricas analisadas foram os mesmos do ensaio de massa específica, listados na tabela 7.

### 3.2.1.4 Procedimento de lavagem

As amostras de CzP-SF e AGR-SF que foram usadas para o ensaio de granulometria, massa específica e massa unitária foram lavadas para avaliar a possível influência nessas propriedades da perda de massa das amostras durante a lavagem, em função da perda de finos, antes aderidos aos grãos maiores.

Para o procedimento de lavagem, as amostras foram postas na peneira 0,15mm, sob água corrente.

### 3.2.2 Composição das misturas granulares

A faixa granulométrica de todas as misturas utilizadas na pesquisa foi de  $4,8 > \phi > 0,15\text{mm}$ , escolhida com a finalidade de manter a mesma distribuição dos grãos nas misturas compostas, visto que o material usado como referência não possuía grãos menores que 0,15mm. Desta forma, a igualdade entre as granulometrias pôde ser respeitada, visto que as misturas referências de areia IPT foram confeccionadas com a mesma granulometria do AGR-SF e da CzP-SF, ou seja, possuíam a mesma porcentagem para cada tamanho de grão.

Para a identificação de acordo com as propriedades hidrodinâmicas, foram realizadas misturas granulares com substituição da areia por CzP-SF e AGR-SF em teores de 25%, 50%, 75% e 100%. Misturas entre a CzP-SF e o AGR-SF também foram realizadas, com substituição do agregado reciclado sem finos pela CzP-SF em teores de 25%, 50% e 75%.

A igualdade de granulometrias entre as referências e a CzP-SF e o AGR-SF visou manter a mesma estrutura porosa nas misturas granulares, após a substituição, que foi volumétrica, com base na massa unitária dos agregados.

O cálculo utilizado para substituição em volume é dado pela equação 39.

$$m_{\text{resíduo}} = m_{\text{areia}} \times \frac{\delta_{\text{resíduo}}}{\delta_{\text{areia}}} \times \% \text{substituição} \quad \text{Eq. (39)}$$

Nas misturas entre CzP-SF e AGR-SF, a granulometria de ambos os resíduos foi mantida afim de avaliar o comportamento de um material intermediário aos dois resíduos analisados. A tabela 8, a seguir, lista as misturas compostas.

Tabela 8: Composições granulométricas

Famílias								
CzP-SF			AGR-SF			CzP-SF/AGR-SF		
Mistura	%		Mistura	%		Mistura	%	
	CzP-SF	IPT		AGR-SF	IPT		CzP-SF	AGR-SF
<b>100REF CzP</b>	0	100	<b>100REF AGR</b>	0	100			
<b>25CzP 75REF</b>	25	75	<b>25AGR 75REF</b>	25	75	25CzP 75AGR	25	75
<b>50CzP 50REF</b>	50	50	<b>50AGR 50REF</b>	50	50	50CzP 50AGR	50	50
<b>75CzP 25REF</b>	75	25	<b>75AGR 25REF</b>	75	25	75CzP 25AGR	75	25
<b>100CzP</b>	100	0	<b>100AGR</b>	100	0			

As saturações teóricas dessas misturas foram calculadas pela equação 40:

$$S=(1/\delta)-(1/\rho) \quad \text{Eq. (40)}$$

Onde:

$S$  = Saturação teórica

$\delta$  = Massa unitária

$\rho$  = Massa específica

### 3.2.3 Caracterização hidrodinâmica

#### 3.2.3.1 Absorção de água: condição saturado superfície seca

Este ensaio foi realizado na CzP-SF, no AGR-SF e em suas respectivas referências, com a finalidade de mensurar a quantidade de água absorvida pelos grãos dos materiais, para avaliar sua influência nas propriedades hidrodinâmicas desses materiais e das argamassas.

Foram realizados dois procedimentos para determinação dessa propriedade. O primeiro consiste no método normalizado pela NBR NM 30 onde a amostra saturada é submetida a uma corrente de ar até que, quando depositada em um tronco de cone, na retirada deste, ela desmorone, indicando a ausência de umidade superficial. Por fim a amostra foi seca em estufa e a absorção calculada pela equação 41.

$$A_b = \frac{m_{ss} - m}{m} \quad \text{Eq. (41)}$$

Onde:

$A_b$  = absorção

$m_{ss}$  = massa da amostra na condição saturado superfície seca

$m$  = massa da amostra seca.

A amostra, quando submetida à corrente de ar, foi constantemente movimentada para assegurar uma secagem uniforme.

O segundo método consistiu em medir a umidade total ( $h$ ), através da secagem do material e a umidade superficial dos agregados ( $h_{\text{sup}}$ ), pelo método do picnômetro. A absorção dos grãos correspondeu à diferença entre essas duas medidas:

$$A_b = h - h_{\text{sup}} \quad \text{Eq. (42)}$$

Considerando a umidade total e a umidade superficial como:

$$h = \frac{m_h - m}{m} \quad \text{e} \quad h_{\text{sup}} = \frac{100(\rho K - m_h)}{\rho(m_h - K)} \quad \text{Eq. (43)}$$

Onde:

$$m_h = m_c - m_a$$

$$K = P_{ag} - (P_{ag+a} - m_h)$$

$m_h$  = massa úmida

$m_a$  = massa do picnômetro meio cheio

$m_c$  = massa do picnômetro meio cheio com amostra.

$m$  = massa seca

$P_{ag}$  = massa do picnômetro com água

$P_{ag+g}$  = massa do picnômetro com água mais amostra

$\rho$  = massa específica aparente

### 3.2.3.2 Absorção capilar

A absorção capilar do material granular foi medida a partir do ensaio de absorção de água por capilaridade. A partir desta propriedade foi determinada a sorptividade das misturas, visando entender o comportamento hidrodinâmico dos materiais. Com o ensaio, considerações quanto à absorção dos grãos e à estrutura porosa puderam ser realizadas.

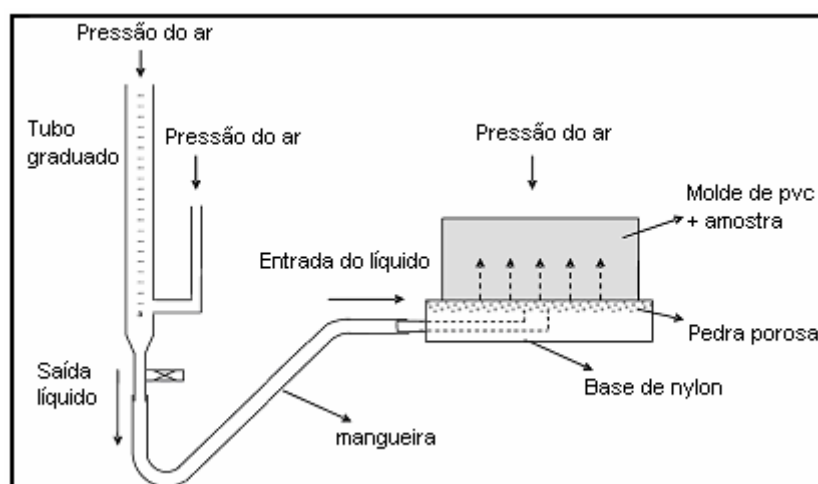
A absorção de água por capilaridade foi realizada com base no método usado por Andrade; Rocha; Cheriaf (2007) que avaliaram a absorção capilar de materiais granulares compostos de cinza pesada e areia natural. Foi utilizado um anel cilíndrico de pvc de 10,2cm de diâmetro e 4cm de altura para acomodar as amostras granulares.

A absorção do material granular foi realizada com o material em três estados de compactação para avaliar o efeito do refinamento dos poros. O estado solto, onde o adensamento das partículas era causado por queda livre, e mais dois estados de compactação, chamados 1 e 3.

Nos estados 1 e 3, a compactação foi realizada com um peso de 4kg, lançado na amostra a um 1cm de altura, a cada camada. O preenchimento dos moldes foi feito com 2 camadas no estado de compactação 1 e 4 no estado de compactação 3. A superfície da camada a ser sobreposta foi escarificada para facilitar a aderência entre as camadas. As amostras foram compactadas na mesma base onde os moldes foram submetidos à absorção capilar.

Em um primeiro momento, a base foi desconectada das colunas de água e utilizada para definir a quantidade de material necessário para cada estado de compactação. Em um segundo momento, quando a massa das amostras já estava definida, a base foi novamente conectada e o ensaio foi realizado.

No ensaio, a face inferior do anel cilíndrico foi submetida a ação capilar. A quantidade de água absorvida foi medida por procedimento experimental já consolidado no grupo Valores, que consiste em medir a variação da altura de uma coluna de água contida em um tubo de Mariotte graduado em função do tempo. O tubo de mariotte graduado abastece uma base de nylon, onde o anel cilíndrico é colocado. A carga hidráulica do tubo é nula. A figura 31 de Andrade; Rocha; Cheriaf (2007) reproduz o equipamento utilizado no ensaio.



**Figura 31: Esquema de ensaio de absorção capilar em material granular**

Fonte: Adaptado de Andrade; Rocha; Cheriaf (2007).

A água usada no ensaio foi destilada e deionizada.

O teor de água absorvido, o grau e tempo de saturação, as velocidades de absorção e as sorptividades das misturas foram analisados. Como as composições não

alcançaram o mesmo grau de saturação, foi definido um grau de saturação comum a todas as misturas na análise do tempo de saturação.

Para calcular o grau de saturação das misturas submetidas a absorção capilar, calculou-se porcentagem de água mássica absorvida pelas misturas. A relação entre esse valor e a saturação teórica é o grau de saturação das amostras conforme apresentado na equação 44.

$$S_w = \frac{V_a/m_s \times 100}{S} \quad \text{Eq. (44)}$$

Onde:

$S_w$  = Grau de saturação

$S$  = Saturação teórica

$V_a$  = Volume de água

$m_s$  = massa seca

Considerando que o grau de saturação final e a quantidade de água presente em cada composição interferiram no tempo de absorção das misturas, esta característica foi avaliada em função de uma mesma quantidade de água absorvida, a partir de uma saturação comum a todas as misturas e da saturação máxima de cada mistura.

### 3.2.3.3 Perda de água por secagem ao ar

Este ensaio foi realizado a fim de observar a cinética de secagem e a retenção de água dos materiais, importantes para o campo das argamassas visto que a presença prolongada de umidade no seu interior induz ao aparecimento de agentes agressivos.

O ensaio também foi baseado no método usado por Andrade; Rocha; Cheriaf (2007), cujas amostras foram colocadas em anel cilindro metálico e submetidas a condições de temperatura e umidade ambiente ( $22 \pm 2$  °C e  $60 \pm 5\%$ ) até que o equilíbrio higroscópico fosse observado.

Após o ensaio de absorção capilar uma parte da amostra foi extraída para medição de sua secagem ao ar. A extração foi feita cuidadosamente, para minimizar diferenças na massa unitária.

O procedimento de retirada de parte da amostra confinada foi similar ao procedimento usado em estudos geotécnicos, na retirada de amostras de solo.

As amostras foram pesadas até que se observou a constância de massa. Em seguida, foram colocadas em estufa a 105°C.

As composições granulares usadas para o ensaio de secagem ao ar corresponderam às mesmas misturas utilizadas no ensaio de absorção capilar.

Considerando que o grau de saturação inicial e a quantidade de água presente em cada composição interferiram no tempo de secagem das misturas, esta característica



também foi avaliada em função da saturação máxima de cada mistura, a partir de uma saturação comum a todas as misturas e a partir de uma mesma quantidade de água no interior das amostras.

### 3.2.4 Produção das argamassas

Para as argamassas foi adotado o traço 1: 3, na proporção de cimento e agregado, utilizado em outras pesquisas do Laboratório Valores, para possibilitar uma análise geral dos resultados encontrados. Quando da determinação do traço a ser utilizado nas pesquisas, a relação água/cimento foi estabelecida em função da mistura com 100% de cinza pesada, por esta ter um maior potencial de absorção dos grãos. A relação água/cimento escolhida foi a que permitiu uma trabalhabilidade adequada para moldagem com esta mistura.

Nesta pesquisa, a relação água/cimento determinada acima foi fixada para todas as misturas. O traço estabelecido e usado foi de 1: 3: 0,66 na proporção de cimento, agregado e relação a/c. As argamassas confeccionadas e seu traço em massa e em volume estão apresentados na tabela 9 a seguir.

**Tabela 9: Misturas**

Mistura	composição	Traço em massa	Traço em volume
		Cimento:Agregado 1:Agregado 2: água	Cimento:Agregado 1:Agregado 2: água
<b>100REF CzP</b>	Cimento + 100REF CzP + água	1:3:0,66	1:1,95:0,66
<b>25CzP75REF</b>	Cimento + 25CzP + 75REF CzP + água	1:2,25:0,25:0,66	1: 1,46:0,49:0,66
<b>50CzP50REF</b>	Cimento + 50CzP + 50REF CzP + água	1:1,5:0,51: 0,66	1: 0,98: 0,98: 0,66
<b>75CzP25REF</b>	Cimento + 75CzP + 25REF CzP + água	1: 0,75: 0,77: 0,66	1: 0,49: 1,46: 0,66
<b>100CzP</b>	Cimento + 100CzP + água	1: 1,02: 0,66	1: 1,95: 0,66
<b>100REF AGR</b>	Cimento + 100REF AGR + água	1: 3: 0,66	1: 1,92: 0,66
<b>25AGR75REF</b>	Cimento + 25AGR + 75REF AGR + água	1: 2,25:0,57: 0,66	1:1,44: 0,48: 0,66
<b>50AGR50REF</b>	Cimento + 50AGR + 50REF AGR + água	1: 1,5: 1,14:0,66	1: 0,96: 0,96: 0,66
<b>75AGR25REF</b>	Cimento + 75AGR + 25REF AGR + água	1: 0,75: 1,70: 0,66	1: 0,48: 1,44: 0,66
<b>100AGR</b>	Cimento + 100AGR + água	1: 2,27: 0,66	1: 1,92: 0,66
<b>25CzP 75AGR</b>	Cimento + 25CzP + 75REF AGR + água	1: 0,77: 0,58: 0,66	1:1,46: 0,49: 0,66
<b>50CzP 50AGR</b>	Cimento + 50CzP + 50REF AGR + água	1:0,51: 1,16: 0,66	1: 0,98: 0,98: 0,66
<b>75CzP 25AGR</b>	Cimento + 75CzP + 25REF AGR + água	1: 0,25: 1,74: 0,66	1: 0,49: 1,46: 0,66

Um misturador mecânico, cuja cuba era de aço inoxidável e de capacidade de dez litros, foi utilizado na produção das argamassas.

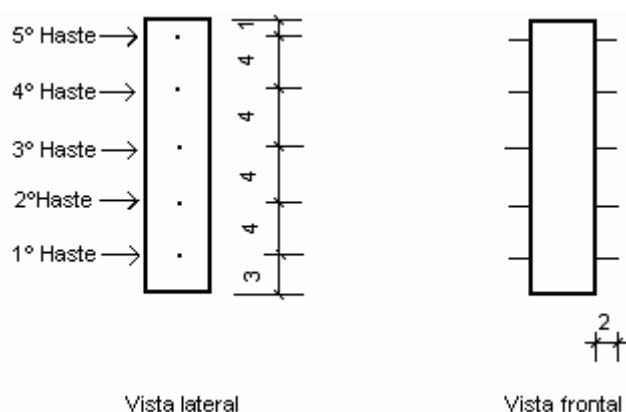
Como o tempo de moldagem dos corpos-de-prova utilizados nessa pesquisa foi maior, em função da particularidade das amostras, primeiro, metade da água foi misturada com os agregados para saturação prévia em velocidade baixa por meio minuto, na intenção de amenizar o possível aumento de consistência das argamassas com altos teores de cinza pesada durante a moldagem, devido à alta absorção dos grãos de cinza.

Em seguida, o cimento foi adicionado e deu-se a mistura em velocidade baixa por mais meio minuto, quando foi adicionado o restante da água. Houve nova mistura por mais meio minuto em velocidade baixa. O misturador foi desligado e o material foi misturado na cuba, com o auxílio de uma espátula. Em seguida foi novamente ligado em velocidade alta por mais um minuto. A água utilizada na confecção das argamassas foi destilada e deionizada.

Foram moldados corpo-de-prova cilíndricos de dimensões 5 x 10 cm, sendo diâmetro e altura, em moldes metálicos previamente revestidos com filme plástico rígido, em substituição ao óleo, para evitar o entupimento dos poros das amostras. Os moldes foram preenchidos em duas camadas com dez golpes e cinco quedas na mesa de queda livre, cada.

Moldes em PVC de 4,7 cm de diâmetro interno e 20 cm de altura também foram utilizados e preenchidos em quatro camadas, com o mesmo numero de golpes e quedas na mesa das amostras de 5 x 10 cm.

Estes moldes em PVC possuíam orifícios ao longo de sua altura por onde foram inseridas hastes metálicas, perpendiculares às amostras, durante a moldagem (figura 32).



**Figura 32:** Altura dos orifícios no molde de pvc e vista lateral do molde com as hastes introduzidas.

Também foram moldados corpos-de-prova em moldes de PVC de 2,0x 0,5cm, sendo diâmetro interno e altura (figura 33), onde hastes metálicas foram previamente fixadas. Nessas amostras, manteve-se a mesma massa específica fresca das amostras de 4,7 x 20cm.



**Figura 33: Molde em PVC, com hastes pré-fixadas.**

Após moldagem, os corpos-de-prova foram acondicionados em recipiente hermeticamente fechado até serem desmoldados, com a parte superior protegida com vidro, para evitar a evaporação da água.

Na desmoldagem, os corpos de prova foram embalados com filme plástico e papel alumínio, para evitar influências externas e novamente acondicionados em recipiente hermeticamente fechado, onde foram mantidos até a idade de 28 dias.

Aos 28 dias, as amostras foram secas em estufa ventilada a 50°C, até constância de massa. A tabela 10 apresenta a quantidade de amostras produzidas para cada ensaio.

**Tabela 10: Quantitativo de amostras**

<b>Ensaio</b>	<b>Quantidade de amostras/ cada mistura</b>
Massa específica Absorção capilar água/ álcool Porosidade	1
Resistência elétrica	10
Perfil de umidade	1

### **3.2.5 Medição de propriedades no estado fresco.**

#### **3.2.5.1 Massa específica aparente de acordo com a NBR 13278/05**

O ensaio de massa específica foi realizado em cada mistura de argamassa, nas amostras de 5cm x 10cm em diâmetro e altura, respectivamente.

### 3.2.6 Determinação de propriedades físicas, hidrodinâmicas e elétricas no estado endurecido.

#### 3.2.6.1 Massa específica no estado endurecido

Foi determinada pelo método geométrico. Um paquímetro foi usado para medir as dimensões dos corpos de prova, calculadas a partir da média de oito medidas em cada direção das amostras.

Os corpos de prova usados para o cálculo da massa específica tiveram sua hidratação interrompida aos 28 dias de idade, quando foram postos em estufa, a 50°C, para secagem até constância de massa.

#### 3.2.6.2 Porosidade aberta e absorção de água em concordância com a NBR 9778/05.

As amostras usadas no ensaio de absorção capilar a álcool e a água foram reaproveitadas para determinação da porosidade das argamassas, através do ensaio de absorção por imersão.

As argamassas foram imersas em água destilada e deionizada por 72 horas, até a constância de peso. As amostras ficaram com 1/3 do seu volume imerso nas primeiras quatro horas. Em seguida, 2/3 da amostra foram imersos até oito horas de duração do ensaio. Nas últimas 64 horas, as amostras permaneceram completamente imersas. A absorção de água é calculada por:

$$Porosidade = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \quad \text{Eq. (45)}$$

A porosidade aberta das argamassas corresponde à sua absorção de água, em porcentagem.

Para calcular o volume de poros do material em relação ao seu volume e assim comparar este material a outros de densidade diferente, a equação 45 é reescrita como:

$$Porosidade = \frac{M_{sat} - M_s}{V_s} \quad \text{Eq. (46)}$$

Onde:

Msat = Massa da amostra saturada

Ms = Massa da amostra seca

Vs = Volume do sólido

#### 3.2.6.3 Absorção capilar de água

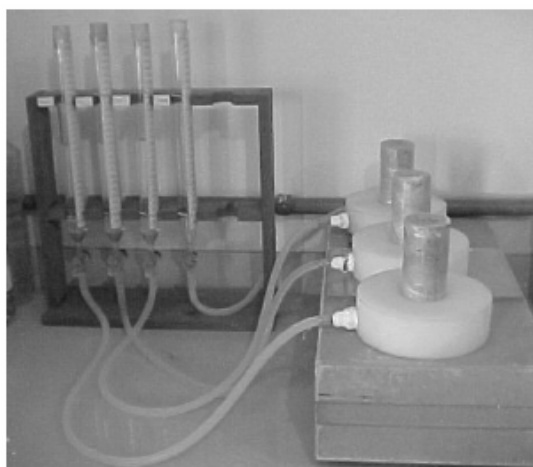
O ensaio de absorção capilar foi usado para medir a absorção capilar e a sorptividade das argamassas e segue o mesmo princípio do ensaio realizado com o

material granular, sendo utilizado o mesmo aparato para medição do conteúdo de água infiltrado na amostra. A diferença consiste em que, nas argamassas, as amostras são diretamente colocadas sobre a base de nylon, alimentada pelo tubo de mariotte. A água utilizada para este ensaio também foi destilada e deionizada.

As faces laterais das amostras foram protegidas por filme plástico para evitar a evaporação de água por essas superfícies.

As amostras utilizadas no ensaio de absorção capilar a álcool foram reaproveitadas para o ensaio a água, mas foram previamente secas.

A figura 34 mostra o aparato experimental para o ensaio.



**Figura 34: Aparato utilizado no ensaio de absorção capilar**

Fonte: Santos (2006)

#### **3.2.6.4 Ângulo de molhamento aparente**

O ângulo de molhamento aparente das argamassas foi medido a partir dos dados do ensaio de absorção capilar a água, descrito acima, e a álcool. Os resultados deste ensaio foram importantes para avaliar a influência do comportamento da parede da estrutura porosa das diferentes argamassas utilizadas frente ao líquido utilizado. O aparato utilizado para o ensaio com álcool é o mesmo do ensaio de absorção de água, com substituição da água destilada por álcool etílico.

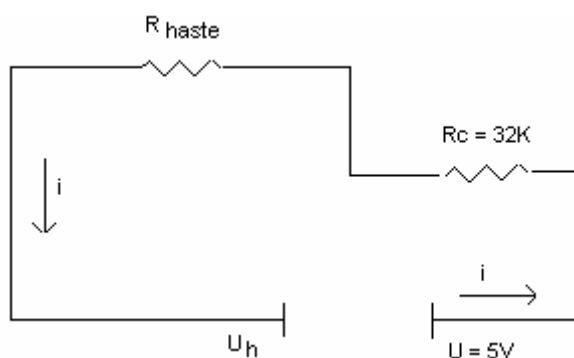
#### **3.2.6.5 Resistência elétrica**

As resistências elétricas das argamassas foram medidas com a finalidade de montar uma curva de calibração onde se conhecesse os valores de resistência a diferentes teores de umidade.

Para montar a curva de calibração, dez amostras com hastes metálicas (figura 33) foram usadas para determinar a resistência elétrica de cada argamassa.

As hastes metálicas presentes nas sondas funcionaram como eletrodos por onde foi passada uma corrente elétrica. As sondas foram conectadas a um multímetro, envolvidas com filme plástico e papel alumínio para evitar o ganho de umidade presente no ar. Os potenciais elétricos medidos foram registrados por um aquisitor de dados. Quando o equilíbrio na medição foi observado, uma seringa foi utilizada para injetar umidade nas amostras. Cada amostra foi umidificada com teores de umidade diferentes.

Através dos dados de entrada de potencial elétrico e da resistência imposta ao sistema, obteve-se a resistência elétrica das argamassas para diferentes teores de umidade. O esquema da figura 35 ilustra o sistema para medição das resistências elétricas.



**Figura 35:Esquema do sistema**

Onde:

U = Potencial elétrico emitido;

i = Corrente elétrica;

R<sub>c</sub> = Resistência imposta ao sistema para diminuir o valor da corrente a circular;

R<sub>haste</sub> = Resistência registrada pelas hastes da amostra

U<sub>h</sub> = Potencial elétrico de retorno.

A resistência registrada nas amostras é dada por:

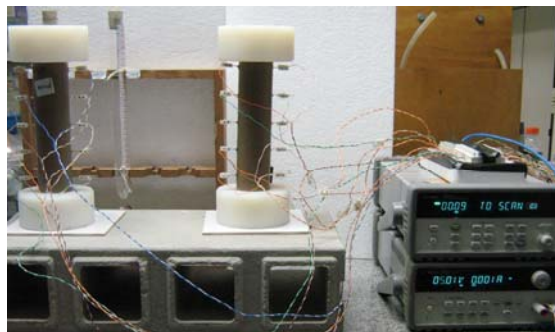
$$R_{haste} = \frac{U - U_h}{i} \quad \text{Eq. (46)}$$

$$\text{onde:} \quad i = \frac{U_h}{R_c} \quad \text{Eq. (47)}$$

### 3.2.6.6 Perfil de umidade

Para medir o perfil de umidade das argamassas quando submetidas a absorção capilar, foi utilizado o mesmo aparato experimental da medição das resistências elétricas. Foram usadas as amostras de 4,7cm de diâmetro e 20 cm de altura, cujas hastes metálicas foram usadas para passagem de corrente elétrica pelo meio.

Em paralelo, as amostras foram sujeitas a absorção de água por capilaridade no aparato usado na absorção capilar, de modo que, à medida que a água penetrou nas amostras, a resistência elétrica foi alterada. Seu topo foi protegido com uma base de nylon para minimizar o ganho de umidade presente no ar, mas a base possuía um orifício de meio milímetro no centro para permitir a saída do ar, presente na amostra (figura 36). Durante o ensaio, a umidade relativa do ar e a temperatura do ar e da água foram registradas.



**Figura 36: Aparato utilizado para medição do perfil de umidade.**

Para traçar o perfil de umidade, as curvas de calibração foram utilizadas. Conhecendo-se as alturas das hastes e o instante em que a água alcança essas alturas, pela alteração na resistência elétrica, foi traçado o perfil da umidade no interior da amostra, considerando o valor de umidade obtido na curva de calibração, referente ao valor de resistência registrado.

## 4. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo, os resultados da pesquisa para o material granular e para as argamassas são apresentados e analisados respectivamente.

Nos gráficos, as misturas granulares e argamassas com CzP-SF são chamadas de CzP, as misturas com AGR-SF, de AGR e as misturas entre CzP-SF e AGR-SF de CzP AGR. A letra S indica o estado de compactação solto, o número 1, a compactação 1 e o 3, a compactação 3.

### 4.1 Caracterização física dos agregados

A tabela 11 apresenta todos os resultados da caracterização física realizada na CzP-SF, no AGR-SF, em suas referências e nos agregados com fração fina. Os resultados referentes à granulometria, massa específica, massa unitária e procedimento de lavagem de cada agregado são analisados e discutidos detalhadamente nos tópicos a seguir.

**Tabela 11: Caracterização física dos agregados de substituição**

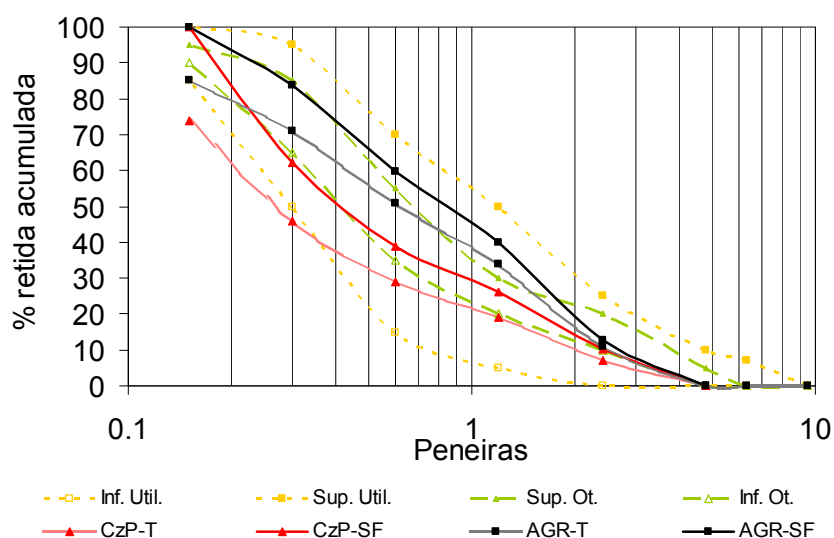
<b>Material Parâmetro</b>	<b>CzP-SF (4,8&gt;Ø&gt;0,15)</b>	<b>CzP-T (Ø&lt;4,8)</b>	<b>AGR-SF (4,8&gt;Ø&gt;0,15)</b>	<b>AGR-T (Ø&lt;4,8)</b>	<b>REF CzP-SF</b>	<b>REF AGR-SF</b>
<b>Diâmetro máximo (mm)</b>	> 2,4*	> 2,4*	>2,4*	> 2,4*	> 2,4*	>2,4*
<b>Diâmetro mínimo (mm)</b>	0,15	0,15	< 0,15	< 0,15	0,15	< 0,15
<b>Módulo de finura</b>	2,37	1,75	2,97	2,52	2,37	2,97
<b>Coef. uniformidade</b>	0,13	0,11	0,25	0,18	0,13	0,25
<b>Coef. curvatura</b>	1,30	0,784	1,66	1,86	1,30	1,66
<b>Material &lt; 0,15mm (%)</b>	0	26	0	15	0	0
<b>Classificação zona NBR 7211-05</b>	Utilizável	Sem classificação	Utilizável	Utilizável	Utilizável	Utilizável
<b>Classificação zona NBR 7211-83</b>	Fina	Sem classificação	Média	Sem classificação	Fina	Média
<b>M. específica (g/cm³)</b>	1,9638	2	2,6471	2,6879	2,6440	2,6424
<b>M. específica após lavagem (g/cm³)</b>	1,9365	--	2,6467	--	--	--
<b>M. unitária (g/cm³)</b>	0,5246	0,61	1,1864	1,2781	1,5364	1,56213
<b>M. unitária após lavagem (g/cm³)</b>	0,5227	--	1,213	--	--	--

\* O diâmetro máximo pode estar entre a peneira 2,4 e 4.8.

A figura 37 apresenta os limites das zonas utilizável e ótima, definidas pela 7211/05, e as curvas de distribuição granulométrica de cada agregado, a partir das quais



foram obtidos os parâmetros: diâmetro máximo e mínimo, módulo de finura, coeficiente de uniformidade e de curvatura e porcentagem de finos, apresentados na tabela 10.



**Figura 37: Distribuição granulométrica da CzP e do AGR.**

#### • CzP- Resultados.

Quanto à distribuição granulométrica, a quantidade de finos encontrada na CzP-T foi de 26% em massa. Sem os finos, a CzP-SF passou a ser considerada um material utilizável como agregado. A figura 37 mostra a mudança na distribuição granulométrica da CzP-T, quando a fração fina (grãos menores que 0,15mm) é retirada.

A graduação dos grãos da CzP-SF diminuiu, quando comparada à CzP-T, como demonstrado na tabela 10, pelo aumento no coeficiente de curvatura em 66% (de 0,784 para 1,3).

A ausência dos finos tornou a CzP-SF ainda mais leve, quando comparada à CzP-T. Sua massa específica teve o valor reduzido em 2%, indicando um aumento da porosidade. Sua massa unitária apresentou redução de 14%, em função do aumento de vazios, antes preenchidos pelos grãos menores.

A CzP-SF apresentou uma perda de massa inferior a 1% após sua lavagem. Entretanto, em novo peneiramento após o procedimento, percebeu-se ainda a presença de finos na CzP-SF. O procedimento de lavagem realizado na CzP-SF apresentou pouca influência nos resultados de suas massas específica e unitária.

#### • CzP - Análises e Considerações.

A quantidade de finos encontrada na CzP-T foi um valor similar ao encontrado por Andrade (2004) e Santos (2006). Sem os finos, quando utilizados em misturas cimentícias, a CzP-SF tende a exigir menos água de mistura.

Por possuir uma massa específica menor, a CzP-SF tende a formar materiais cimentícios com menor massa específica e com poros maiores que a CzP-T. Poros maiores, por sua vez, apresentam um menor potencial de sucção e, quando causam um aumento da porosidade aberta, absorvem mais água.

O fato de a presença de finos ser percebida na CzP-SF após o procedimento de lavagem, está de acordo com as observações de Andrade (2004) que salientou que a CzP destorroa com facilidade.

- **AGR– Resultados.**

Considerando a granulometria, o AGR-T se adequou à zona utilizável da NBR 7211/05. Ainda que sem os finos, o AGR-SF continuou identificado como utilizável e foi classificado como agregado médio, quanto à finura dos grãos. Quando comparado ao AGR-T, a graduação dos grãos do AGR-SF é melhor. Isto foi observado, pelo decréscimo de 11% (de 1,86 para 1,66) no seu coeficiente de curvatura.

Quando comparado à CzP-SF, o AGR-SF apresentou um módulo de finura maior, o que significa que sua granulometria é mais grossa, e um maior coeficiente de curvatura, que indica uma menor graduação dos grãos.

A massa específica do AGR-SF sofreu uma redução de 1,5% e a sua massa unitária de 7%, quando comparado ao AGR-T. Os valores de massa específica e unitária do AGR-SF se apresentaram maiores que os valores da CzP-SF em 34,8% e 126,15%, respectivamente.

Quanto ao procedimento de lavagem, este também apresentou pouca influência nos resultados das massas específica e unitária do AGR-SF. Houve uma perda de massa, após a lavagem, de aproximadamente 3% e em novo peneiramento, após o procedimento, a presença de finos foi desprezível.

- **AGR- Análises e Considerações.**

O AGR-T se adequou à zona utilizável da NBR 7211/05 por ser um material produzido para uso como agregado. A boa graduação do AGR-SF facilita o preenchimento de seus vazios pelos grãos e tende a aumentar a coesão de misturas cimentícias.

Devido à sua granulometria mais grossa, quando comparado com a CzP-SF, considerando só este fator, as misturas cimentícias com o AGR-SF são mais ásperas.

Era esperado que, com a ausência dos finos, fosse observado um leve aumento da massa específica do AGR-SF, quando comparado ao AGR-T, uma vez que os finos foram considerados por identificação visual, em sua maioria, cerâmicos, cuja massa específica é menor que a dos reciclados de concreto. Entretanto, este parâmetro sofreu uma redução de 1,5%, o que indica a presença de argamassa aderida aos grãos. Na massa unitária do AGR-SF, a redução de seu valor, em relação ao AGR-T, foi provocada pelo aumento dos vazios.

O AGR-SF também tende a formar materiais cimentícios com menor massa específica e com poros maiores que o AGR-T. Quando comparado à CzP-SF, a massa específica tende a ser maior e a porosidade menor.

Acredita-se que a superfície do AGR, visualmente mais rugosa, favorece a aderência das partículas finas nas partículas maiores. Em função disso, ainda que o AGR-T apresente menor quantidade de finos que a CzP-T, durante a lavagem desses materiais sem as suas parcelas de finos (então, AGR-SF e CzP-SF), a perda de massa é maior para o AGR-SF do que para a CzP-SF.

- **Referências – Resultados.**

As referências produzidas com a areia IPT possuíram a mesma curva granulométrica dos resíduos e, portanto as mesmas características nos parâmetros referentes ao tamanho e distribuição dos grãos desses materiais.

A referência da CzP-SF apresentou um valor de massa específica 34,7% maior que a da CzP-SF. Na sua massa unitária o aumento observado foi de aproximadamente 200%.

Para a referência do AGR-SF foi observado um aumento na massa unitária de 32%, quando comparado ao AGR-SF. Não houve diferença significativa entre as massas específicas do agregado reciclado sem finos e de sua referência.

Também não houve diferença significativa entre as massas específicas e unitárias das duas referências.

- **Referências – Análises e Considerações.**

A referência da CzP-SF apresentou um valor de massa específica maior que o da CzP-SF, devido à menor porosidade dos grãos da areia IPT, que aumenta sua massa específica.

As massas unitárias das referências da CzP-SF e do AGR-SF aumentaram quando comparadas aos valores da CzP-SF e do AGR-SF, respectivamente, porque, embora a quantidade de vazios entre os grãos tenha se mantido supostamente a mesma,

em razão da igualdade entre as granulometrias, a quantidade de vazios dentro dos grãos diminuiu, aumentando a massa do material e por conseguinte, a razão entre esta e o volume definido que a contém.

Os valores de massa específica das duas referências foram iguais em função de seus grãos possuírem a mesma estrutura porosa.

#### **4.2 Composição das misturas granulares – caracterização física.**

Primeiramente, são apresentadas as curvas granulométricas das misturas utilizadas na pesquisa, seguidas dos resultados e análises das massas específicas e unitárias.

- **Curvas granulométricas**

A figura 38 apresenta os limites das zonas utilizável e ótima, definidas pela 7211/05 e as curvas granulométricas das composições granulares. Pode ser observado na figura que as composições CzP-AGR, produzidas com CzP-SF e AGR-SF, se encontram dentro da faixa de comportamento desses dois materiais e praticamente dentro da zona ótima, definida pela norma.

As misturas entre a CzP-SF e sua referência possuem a mesma curva granulométrica da CzP-SF, em função da igualdade de tamanho entre os grãos e da substituição em volume, que permitiu que a dimensão e quantidade dos grãos acrescentados fosse igual à dimensão e quantidade dos grãos removidos. As misturas entre o AGR-SF e sua referência, também possuem a mesma distribuição granulométrica do AGR-SF.

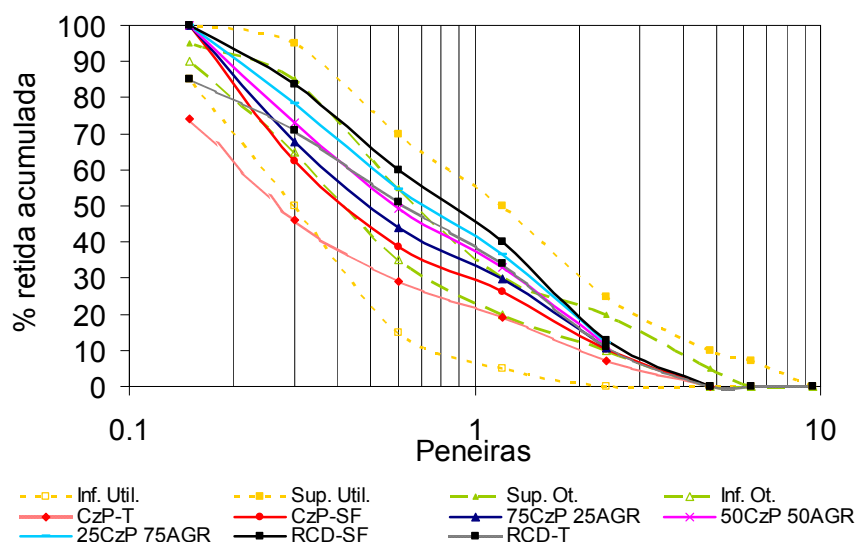


Figura 38: Distribuição granulométrica das misturas.

#### • Massa específica (Picnômetro) - Resultados.

O gráfico da figura 39 mostra o efeito da substituição da areia IPT, na massa específica das misturas. No gráfico, e nos que se seguem, as referências foram sendo substituídas pela CzP-SF e pelo AGR-SF. Nas misturas entre CzP-SF e AGR-SF, o AGR-SF foi sendo substituído por CzP-SF.

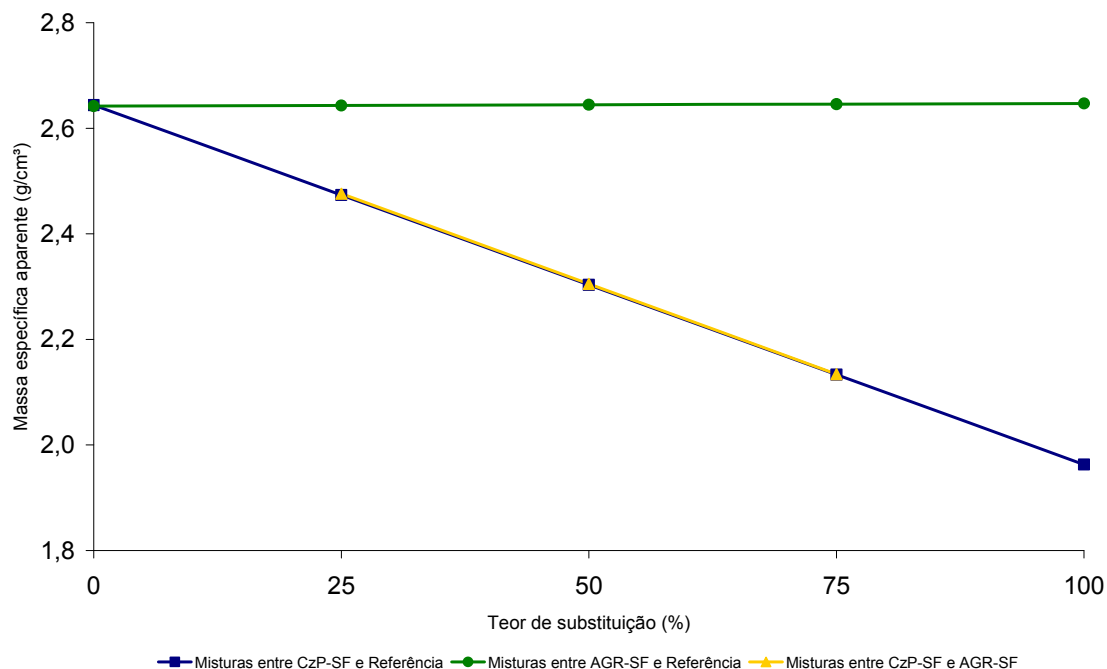


Figura 39: Massa específica aparente x Teor de substituição.

A massa específica das misturas com CzP-SF diminuiu com o aumento do teor de CzP-SF. Entretanto, esta influência não foi tão alta como na massa unitária (que será mostrada a seguir).

Para as misturas com AGR-SF, a influência da substituição foi desprezível, visto que a massa específica dos dois materiais é similar.

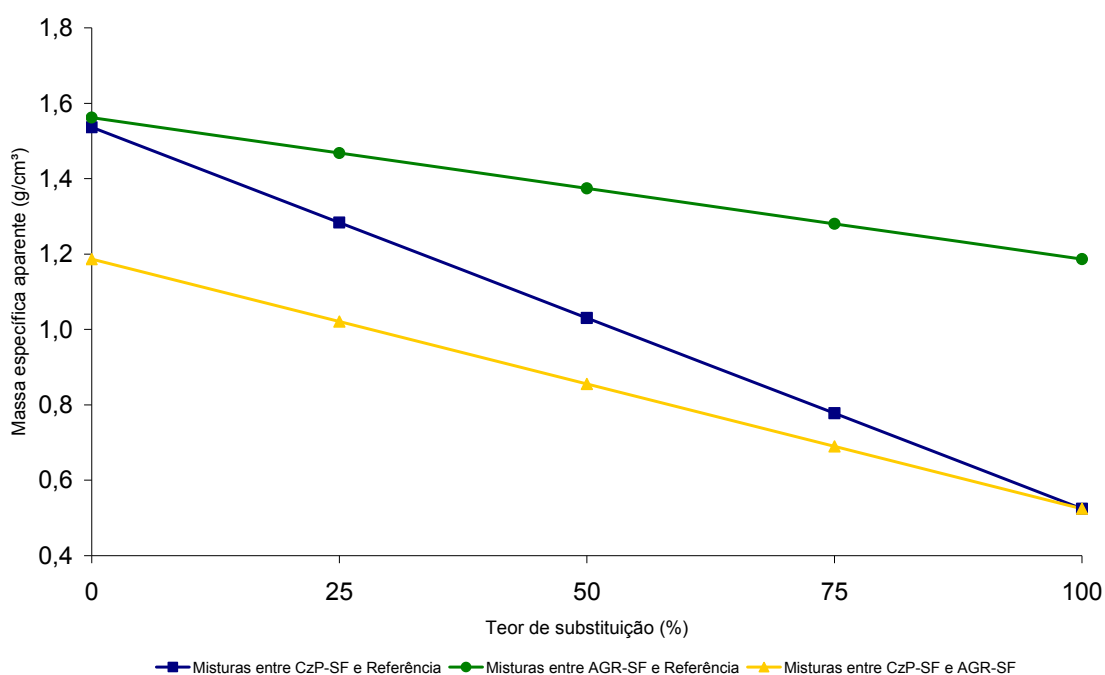
As misturas entre o AGR-SF e a CzP-SF apresentaram valores de massa específica similares às da mistura entre a CzP-SF e sua referência pois a massa específica do AGR-SF é semelhante às massas específicas das duas referências.

- **Massa específica (Picnômetro) – Análises e Considerações**

Devido à variação nos resultados de massa específica com a substituição da areia referência pela CzP-SF, a substituição em massa em misturas cimentícias feitas com estes resíduos leva a uma diferença de volume alta entre os materiais. Já para as misturas com AGR-SF, a substituição em massa pode ser considerada.

- **Massa unitária (NBR7251/82) - Resultados**

O gráfico da figura 40 mostra o efeito da substituição da areia IPT, por material granular mais poroso, na massa unitária das misturas.



**Figura 40: Massa unitária seca x teor de substituição.**

Para as misturas com CzP-SF, a substituição da Areia IPT por material com massa unitária menor resultou em compostos granulares com massas unitárias menores

que a referência. Houve uma diminuição gradativa nos valores. Na mistura com 100% de CzP-SF, essa redução foi de 66,15%, quando a CzP-SF é comparada

Nas misturas entre o AGR-SF e sua referência, também houve uma diminuição da massa unitária, com o aumento do teor de substituição, sendo que na mistura com 100% de AGR-SF, a redução foi de 24%.

Quando comparada às misturas com CzP-SF, as misturas com AGR-SF tiveram uma faixa de variação de massa unitária 63% menor.

Nas misturas entre a CzP-SF e o AGR-SF, a substituição do AGR-SF, de maior massa unitária, pela CzP-SF, também resultou em misturas com menor massa unitária. A massa unitária da mistura com 75% de CzP-SF e a 25% de AGR-SF reduziu 32,4%, em comparação à mistura com 25% de CzP-SF e 75% de AGR-SF.

- **Massa unitária (NBR7251/82)-Análises e Considerações.**

A menor faixa de variação da massa unitária de misturas com AGR-SF, quando comparadas àquelas com CzP-SF, demonstram que as misturas com AGR-SF terão uma menor faixa de variação em propriedades que dependam desse parâmetro, como a absorção capilar. Essas misturas serão menos suscetíveis a mudanças nos valores de massa unitária, em função dos teores de substituição utilizados, do que as misturas com CzP-SF.

### 4.3 Caracterização hidrodinâmica das misturas granulares

#### 4.3.1. Absorção de água dos grãos (Picnômetro e NBR NM 30)- Resultados.

Os valores de absorção de água dos grãos de CzP-SF, AGR-SF e suas referências, determinados pelo método do picnômetro e pela NBR NM 30 estão reunidos na tabela 12. A seguir, os resultados de cada agregado são analisados.

**Tabela 12: Absorção de água- agregados e referências.**

Faixa granulométrica	Absorção granular (média)			
	CzP-SF	REF CzP-SF	AGR-SF	REF AGR-SF
<b>NBR NM 30</b>	7%	0,5%	8%	0,5%
<b>Método Picnômetro</b>	-	0,52%	8,52%	0,47%

- **CzP-SF- Análises e Considerações.**

Não foi possível determinar a absorção de água da CzP-SF por ambos os métodos. No método da NBR NM 30, observou-se que, mesmo consideravelmente

secas, as amostras não desmoronaram com a retirada do tronco de cone. O resultado do ensaio foi um valor de absorção muito baixo (7%). A alta porosidade e a forma irregular dos agregados aumentaram o atrito entre as partículas, mantendo-as unidas após a retirada do tronco de cone e dificultaram a determinação de sua absorção real.

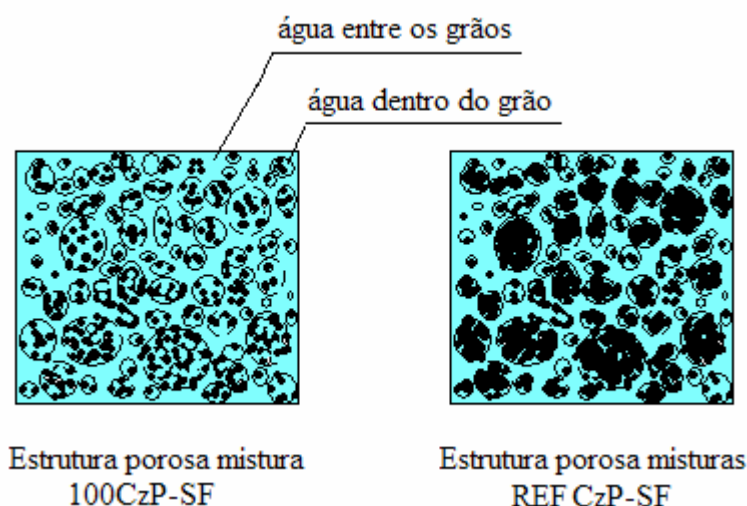
Ainda, a alta porosidade pode ter permitido que a água presente no interior dos grãos evaporasse, mesmo quando toda água superficial ainda não tinha sido removida.

No método do picnômetro, a umidade superficial calculada foi maior do que a umidade total encontrada.

Desta forma, a absorção dos grãos de cinza foi estimada a partir dos resultados do ensaio de absorção capilar no material granular. Os resultados de todas as misturas deste ensaio só serão apresentados e analisados no tópico seguinte. Mas, para explicar como a absorção dos grãos de cinza foi estimada, os resultados da absorção capilar da CzP-SF e de sua referência serão previamente apresentados.

A absorção foi estimada, de modo limitado, a partir das hipóteses de que, durante a substituição granular, a estrutura porosa é mantida e da hipótese de que os grãos de CzP e da areia IPT são predominantemente da mesma forma.

Considerando a misturas 100CzP-SF e REFCzP-SF, suas estruturas porosas se apresentam conforme a figura 41, onde a quantidade de água entre os poros é igual. O que muda é a quantidade de água dentro do grão, que na CzP-SF é maior, devido à sua maior porosidade.



**Figura 41: Estrutura porosa das misturas 100CzP-SF e REF CzP-SF.**

Após o ensaio de absorção capilar, a referência da CzP-SF, apresentou um volume total de água absorvido de 95,99g o que corresponde a uma umidade de 17,85%.



Esta água estava distribuída entre os poros da amostra e os poros do grão. Sabe-se que 0,5% corresponde à absorção do grão. Então, a água presente nos poros capilares é de 17,35%.

Se considerarmos que a estrutura dos poros da mistura de 100%CzP-SF é igual à estrutura de poros de sua referência, então, o volume de água que entra na amostra de CzP-SF, de 187,96g, quando considerada dentro da mistura de referência, corresponde a uma umidade de 34,96%.

Se os poros da amostra referência da CzP-SF estão saturados, o excesso de umidade pode ser considerado como aquela umidade que entrou a mais no grão, que corresponde a 17,11%.

Somando-se este valor, à umidade de 0,5%, dentro do grão, tem-se para a cinza pesada, uma absorção de 17,61%.

- **AGR-SF- Análises e Considerações.**

Os resultados mostram que o agregado reciclado absorve mais água que os agregados naturais, devido a sua maior porosidade. O AGR-SF absorve 8% a mais que a sua referência. Quando comparado à CzP-SF, a absorção dos grãos do AGR-SF é 54,6% menor, considerando o resultado do ensaio pela NM30.

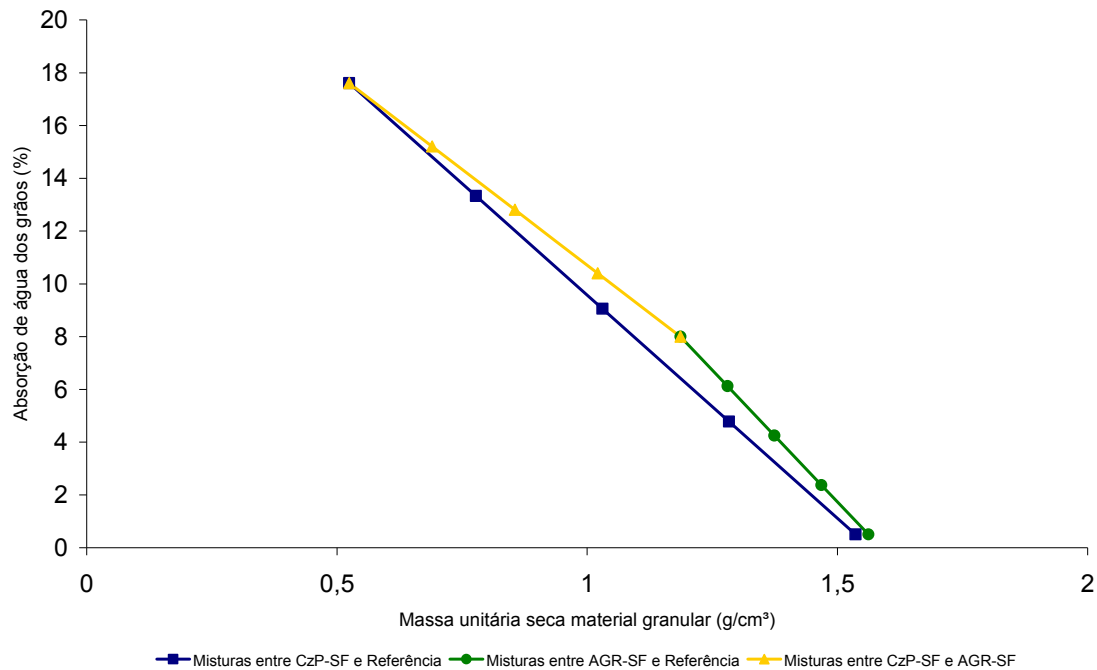
Por absorver menos água em função da sua menor porosidade, o AGR-SF demanda menos água, quando usado em misturas cimentícias. Considerando somente o fator absorção dos grãos, o teor de umidade de equilíbrio de materiais cimentícios que utilizam AGR-SF é menor do que o daqueles materiais que usam a CzP-SF.

- **Referências- Análises e Considerações.**

valores de absorção de água encontrados para os grãos das referências produzidas com areia natural foi similar aos valores de absorção desse tipo de material.

- **Relação com parâmetros físicos**

A figura 42 mostra a relação entre a massa unitária seca das misturas (determinada pela NBR7251/82) e a absorção de água dos grãos. Os valores de absorção das misturas intermediárias aos agregados, cuja absorção foi determinada, foram calculados.



**Figura 42: Absorção dos grãos x massa unitária seca.**

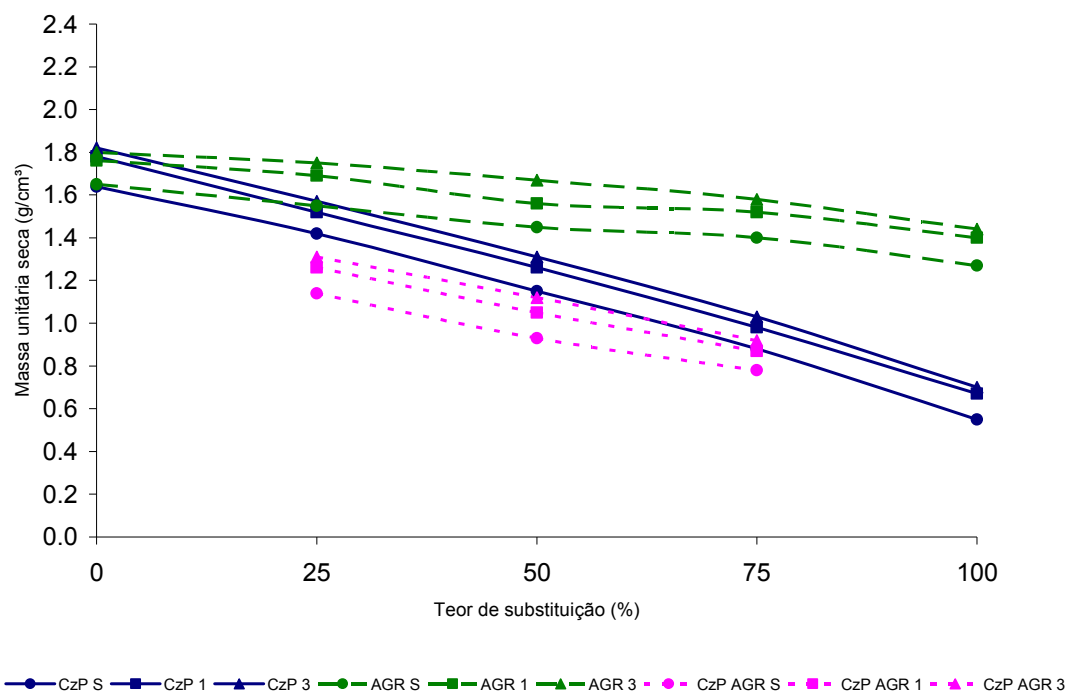
Uma relação de dependência é claramente percebida entre o parâmetro físico e o parâmetro hidrodinâmico em questão. A faixa de absorção de água das misturas com CzP-SF é tão grande quanto a faixa de valores de massa unitária.

#### 4.3.2. Absorção capilar.

Primeiramente, o resultado da compactação nas amostras e o teor de saturação teórico máximo das misturas utilizadas no ensaio de absorção capilar, são apresentados e analisados. Em seguida, são apresentados e analisados os resultados da absorção capilar e do parâmetro sorptividade, para cada agregado e por fim, a relação da absorção com os parâmetros físicos do material granular.

- **Compactação e saturação teórica das amostras- Resultados.**

As massas unitárias secas das misturas usadas para absorção capilar são mostradas na figura 43. As massas unitárias foram calculadas considerando o volume utilizado no ensaio de absorção capilar. A figura mostra que a compactação realizada refinou os poros das amostras e aumentou a quantidade de massa confinada. Amostras mais compactadas apresentaram maior massa unitária do que aquelas confinadas no estado solto.



**Figura 43: Massa unitária seca x Teor de substituição.**

Quanto à capacidade de saturação dessas amostras, a figura 44 mostra que quanto maior o teor de CzP-SF e AGR-SF, maior a saturação teórica das misturas, ou seja, mais poros preenchíveis por água. E que quanto maior o estado de compactação, em uma mesma mistura, menor a saturação teórica, explicada pela redução de vazios em função do refinamento dos poros.

As misturas entre a CzP-SF e o AGR-SF apresentaram maior saturação com o aumento do teor de CzP-SF, mais porosa que o AGR-SF.

- **Compactação e saturação teórica das amostras- Análises e Considerações.**

A faixa de variação de saturação é maior para as misturas com CzP-SF do que para as misturas com AGR-SF, em função da maior faixa de variação de massa unitária dessas misturas.

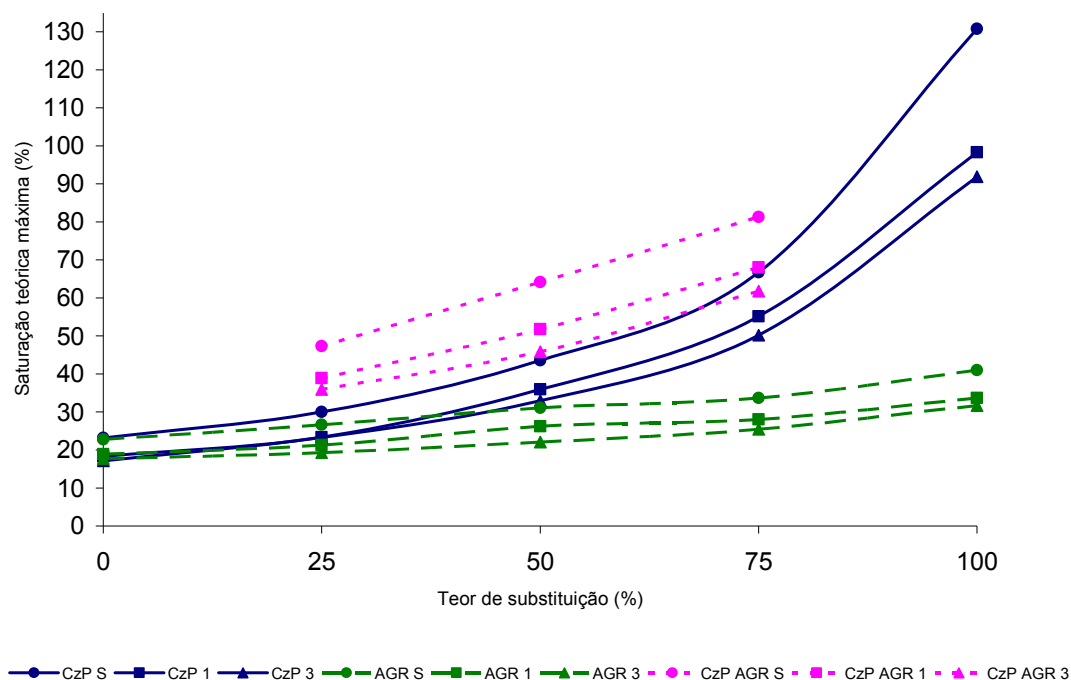


Figura 44: Saturação teórica máxima x Teor de substituição.

### • Absorção de água capilar- Resultados

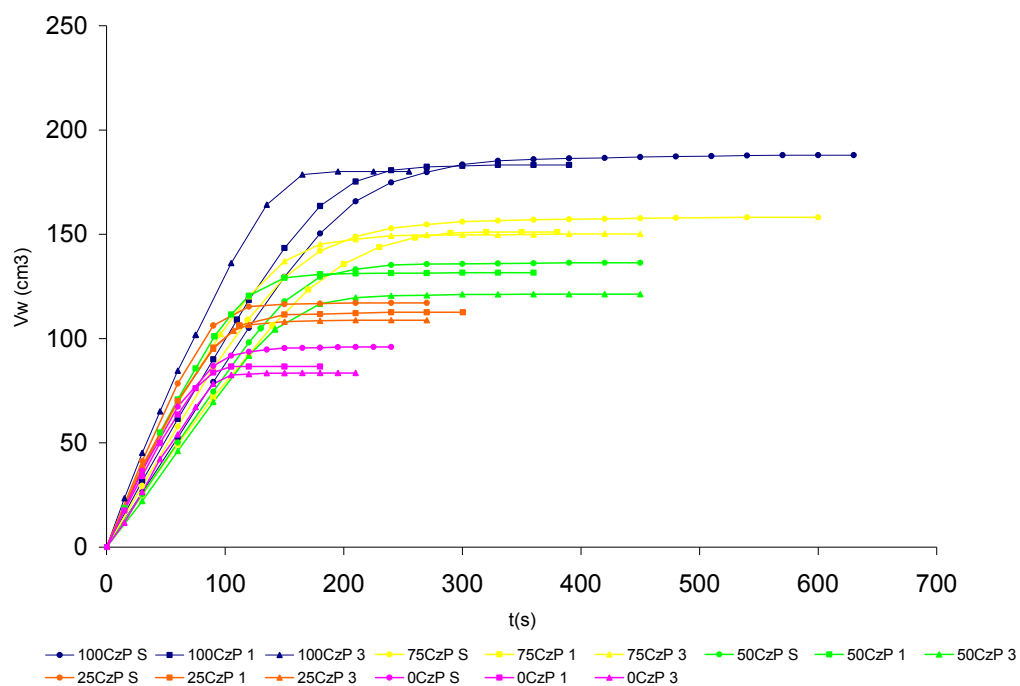
#### ○ Misturas com CzP-SF

A figura 45 mostra o volume de água absorvido para as misturas com CzP-SF. Quanto maior o teor de CzP-SF na mistura, maior a quantidade de água absorvida. Há um aumento gradativo e claro na absorção de água. A absorção da mistura com 100% de CzP-SF, no seu estado solto, aumentou 95,81% quando comparada à referência.

Foi observado que, quanto maior o grau de compactação das amostras de uma mesma mistura, menor a quantidade de água absorvida em função da redução do tamanho dos poros entre os grãos.

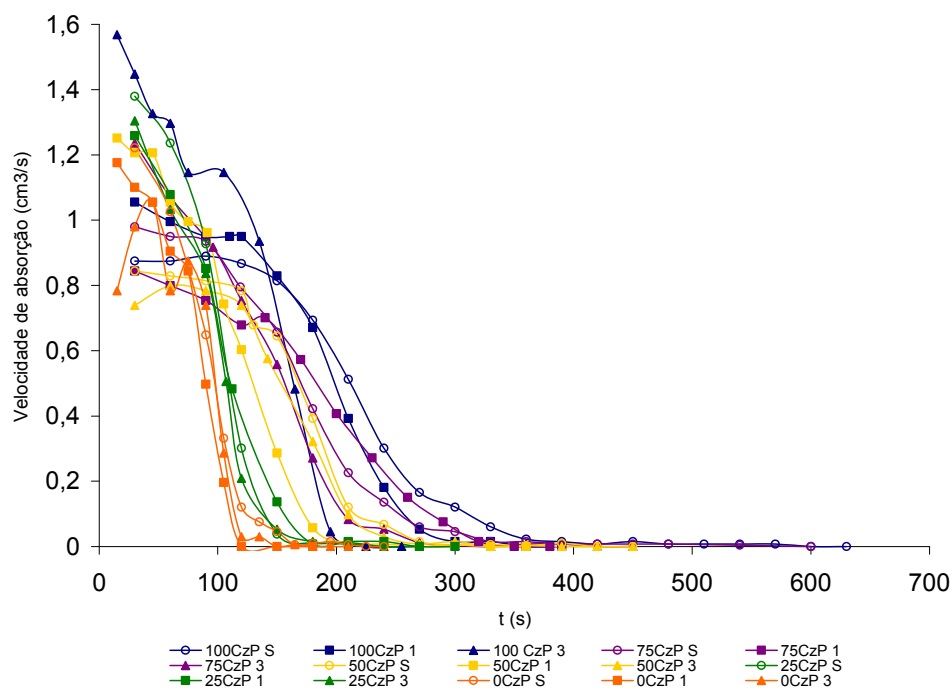
Para uma mesma quantidade de água absorvida, as misturas não apresentaram um comportamento gradativo. Mas foi observada a tendência de menor tempo de absorção de água para as misturas com maiores teores de CzP-SF.

Nas misturas com menores teores de CzP-SF ( com 0% e 25%), para uma mesma quantidade de água absorvida, as amostras no estado solto são as mais rápidas, para uma mesma mistura. Para a mistura com 100% de CzP-SF, a mistura com compactação 3 absorve mais água, para um dado tempo  $t$ , e uma mesma quantidade de água, em menos tempo que as misturas CzP-SF S e 1.



**Figura 45: Volume de água absorvido x tempo- CzP-SF.**

A velocidade de absorção dessas misturas pode ser observada na figura 46 que mostra uma tendência de velocidades maiores, com o aumento do teor de CzP-SF, para um dado instante.



**Figura 46: Velocidade de absorção das misturas com CzP-SF.**

Quanto à saturação, quanto maior o teor de CzP-SF nas misturas, maior o tempo de saturação. Este fato é devido à maior quantidade de poros a ser preenchida pela água.

As misturas com CzP-SF saturaram, em média, com 200s. As misturas com 100% de cinza pesada saturaram, em média, em 275 segundos, enquanto que para as referências da CzP-SF o tempo foi de 160s, um aumento de 72% no tempo de saturação.

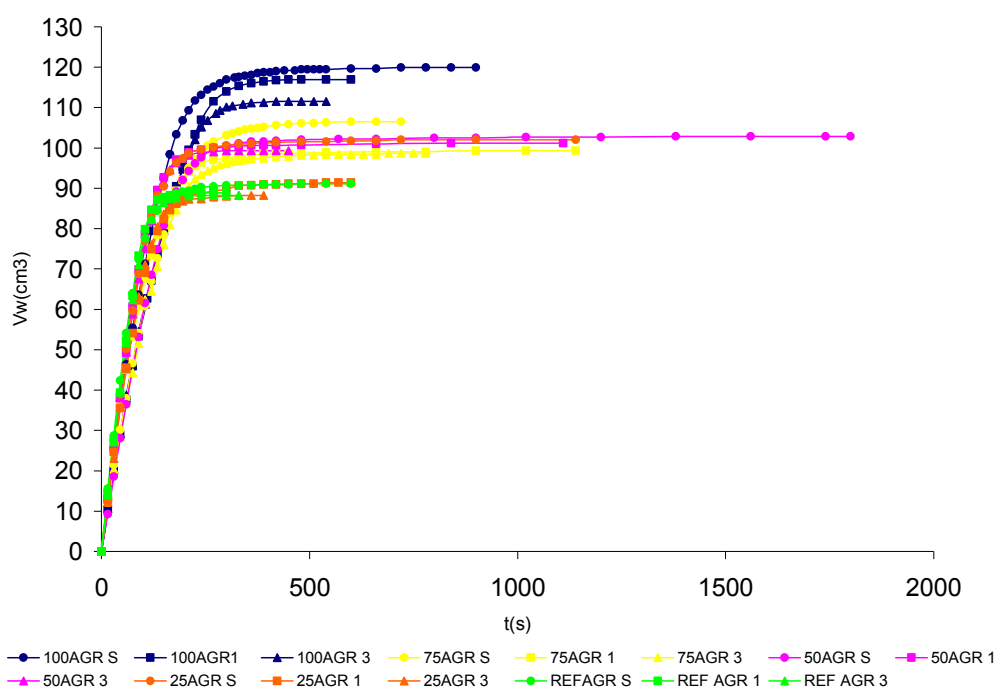
Considerando o grau de saturação a 65%, comum a todas as misturas, a média das composições com 100% de CzP para alcançar 65% de saturação, foi 140 segundos, enquanto que as misturas da referência levaram 65 segundos, cerca de 53,6% a menos.

#### ○ Misturas com AGR-SF.

A figura 47 mostra o ganho de água por absorção capilar das misturas com AGR-SF. A quantidade de água absorvida aumentou com o aumento do teor de AGR-SF, embora este fato não tenha ocorrido gradativamente, como nas misturas com CzP-SF.

A mistura com 100% de AGR-SF, no seu estado solto absorveu 31,64% a mais de água que a mistura referência no estado solto. Em comparação com as misturas com CzP-SF, a faixa de variação de absorção de água das misturas com AGR-SF reduziu 68,66%.

Para as misturas com AGR-SF, a quantidade de água absorvida também reduziu com o aumento do grau de compactação das amostras de uma mesma mistura.

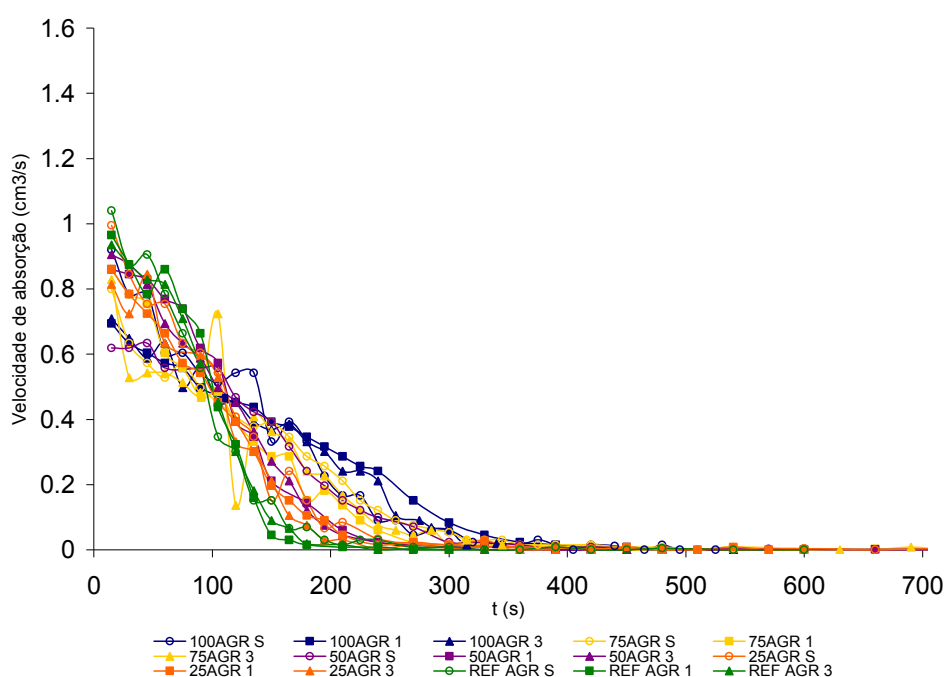


**Figura 47: Volume de água absorvido x tempo- AGR-SF.**

Para uma mesma quantidade de água, as misturas com menores teores de AGR-SF tenderam a absorver água em menos tempo do que as misturas com maiores teores de AGR-SF, comportamento contrário ao observado para as misturas de CzP-SF.

Quanto maior a quantidade de AGR-SF na mistura, menor a velocidade inicial de absorção, como pode ser visto na figura 48.

Na figura, observa-se uma inversão no comportamento das misturas. A partir de um dado instante as velocidades das misturas com maiores teores de AGR-SF passam a ser maiores.



**Figura 48: Velocidade de absorção das misturas com AGR-SF.**

Quando comparado às misturas com CzP-SF, para absorver 75g/cm³ de água, as misturas com 100%AGR-SF demoraram, em média, aproximadamente 130 segundos, enquanto que as misturas com 100% de CzP-SF, em média, absorveram essa quantidade de água, em 70 segundos, 85% a menos.

Nas composições granulares com AGR-SF, foi observado que quanto maior o teor de agregado reciclado, menor o grau de saturação das amostras. Enquanto a mistura com 100% de referência, em média, saturou 80%, a composição com 100% de AGR-SF saturou 73%. Para o teor de Cinza pesada nas misturas, essa tendência no grau de saturação não foi verificada.

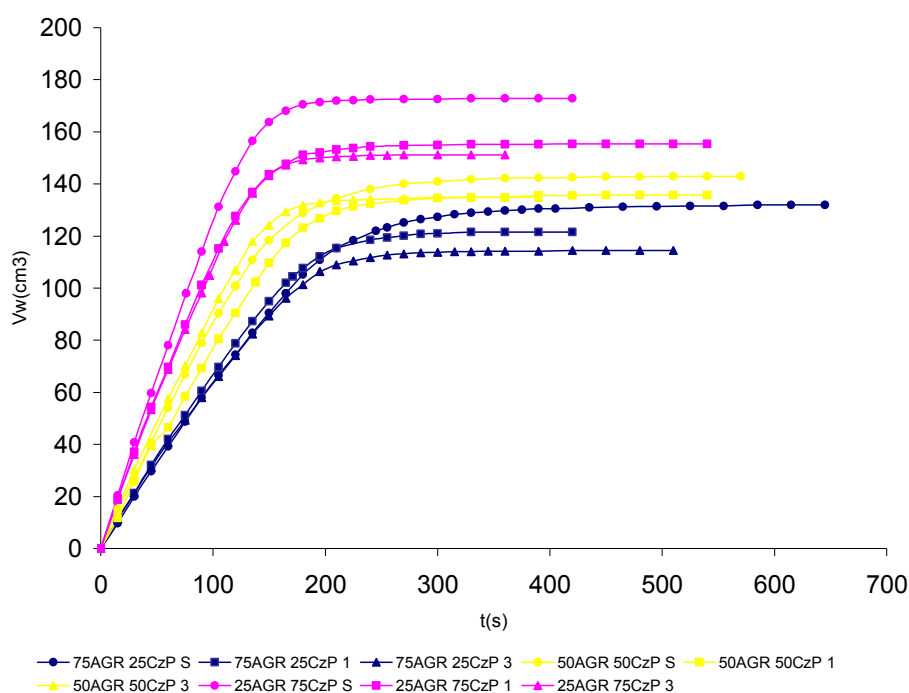
Embora o grau de saturação das misturas com 100% de AGR-SF tenha sido menor, sua média de tempo de saturação foi de 463 segundos, que comparada aos 330 segundos das composições de referência, demonstrou um aumento no tempo de saturação de 40%.

A menor diferença na faixa de tempo de saturação nas misturas com diferentes teores de AGR-SF (40%, enquanto que na cinza pesada foi de 72%) é explicada pela menor faixa de massa unitária e, portanto, de absorção dessas misturas.

#### ○ Misturas entre CzP-SF e AGR-SF.

A figura 49 mostra a absorção de água capilar das misturas entre CzP-SF e AGR-SF. A quantidade de água absorvida aumentou com o aumento do teor de CzP-SF.

Para as misturas entre a CzP-SF e o AGR-SF, o aumento do grau de compactação das amostras de uma mesma mistura também reduziu a quantidade de água absorvida.

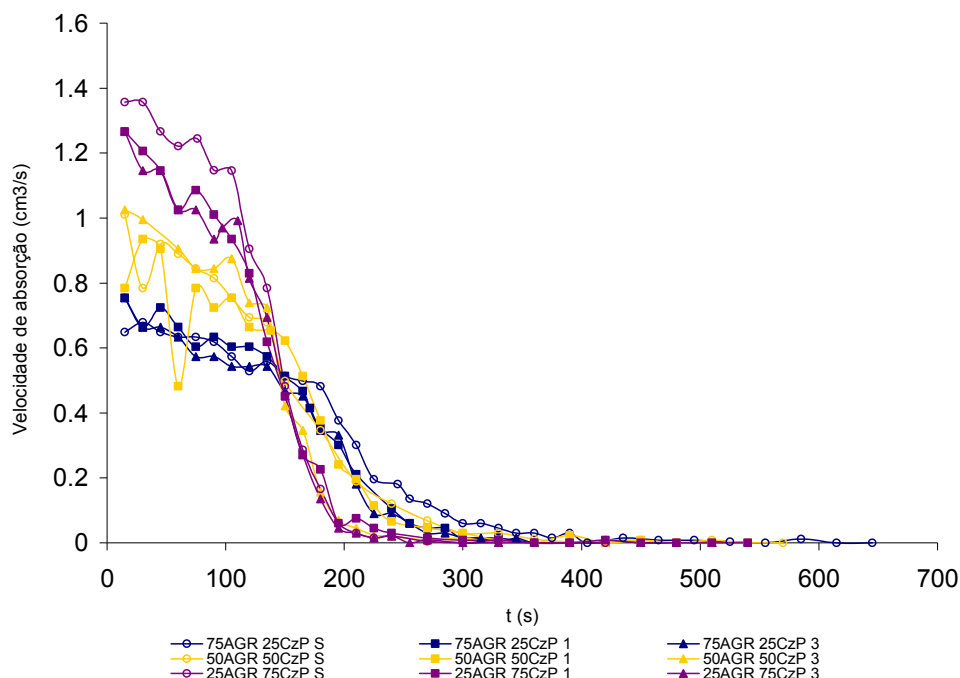


**Figura 49: Volume de água absorvido x tempo- CzP-SF e AGR-SF.**

Para uma mesma quantidade de água, quanto maior a quantidade de CzP-SF, menor o tempo de absorção. Nas misturas entre CzP-SF e AGR-SF, este comportamento é claro. As misturas com 75% de CzP-SF absorvem 75g/cm³ de água, em média, em 65s, enquanto que para as misturas com 25% de CzP-SF e 75% de AGR-SF, esse tempo é , em média, de 118s. Um aumento de 81,5% .



A figura 50 apresenta as velocidades das misturas entre CzP-SF e AGR-SF. A inversão no comportamento observada nas misturas com AGR-SF também foi notada nessas misturas.



**Figura 50: Velocidade de absorção das misturas entre CzP-SF e AGR-SF.**

Nas misturas entre CzP-SF e AGR-SF, quanto maior a quantidade de CzP-SF, mais rápida a saturação. Ainda que a presença da CzP-SF aumente o volume de água absorvido e de poros a serem saturados, as misturas com AGR-SF têm uma saturação bem mais lenta. Então, neste caso, quanto maior a quantidade de CzP-SF, menor o tempo de saturação das misturas. Houve uma redução de 23,6% no tempo de saturação da composição com 75% de CzP-SF e 25% de AGR-SF, quando comparada à mistura de 25% de CzP-SF e 75% de AGR-SF.

Nas misturas entre a CzP-SF e o AGR-SF, a composição 25%CzP-SF-75%AGR-SF chegou a 65% de saturação em 170 segundos, em média, enquanto que a composição 75%CzP-SF-25%AGR-SF, demorou cerca de 110 segundos, 35% a menos.

Em misturas entre a CzP-SF e o AGR-SF, aquela com maior teor de Cinza irá saturar mais rápido.

- **Absorção de água capilar- Análises e Considerações.**

Em função da faixa de variação de absorção de água capilar das misturas com AGR-SF ser bem menor que a das misturas com CzP-SF, as composições com AGR-SF

estão menos suscetíveis ao efeitos hidrodinâmicos provocados pelo teor de substituição, ou seja, se em uma mistura, o agregado de uso corrente for substituído em 25% por AGR-SF, considerando igual todas as outras condições (a/c disponível para mistura, por exemplo), a variação no comportamento hidrodinâmico desta nova mistura será bem menor do que a variação de comportamento de uma mistura cujo agregado foi substituído em 25% por CzP-SF.

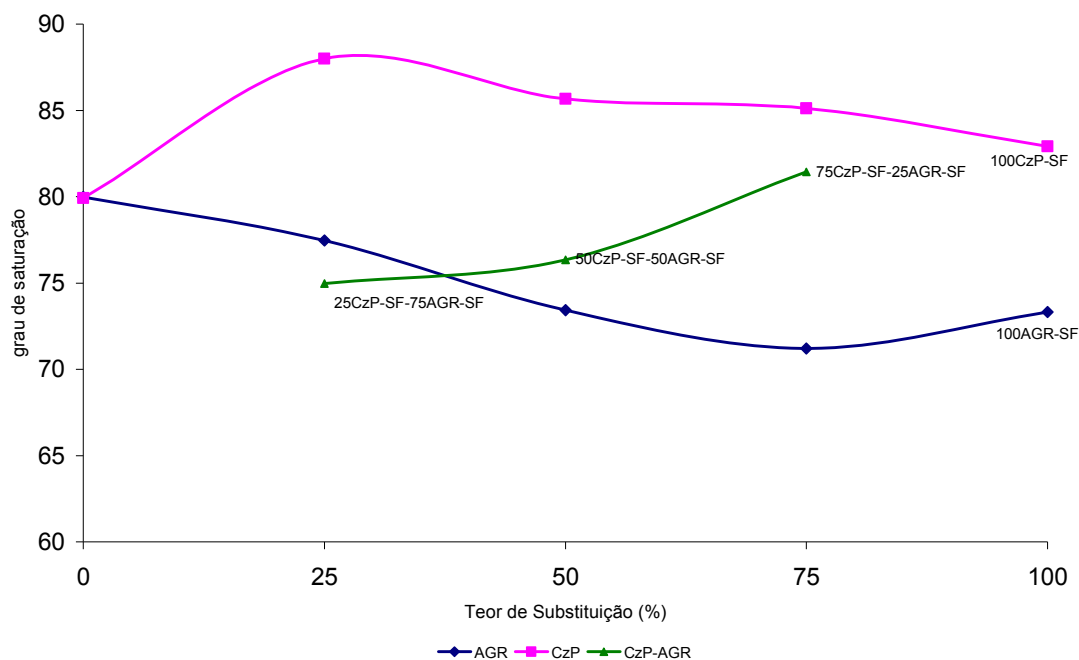
Entre as composições, aquelas com a presença de AGR-SF são as que possuem absorção mais lenta, seguidas pelas composições entre a CzP-SF e o AGR-SF e por último, as composições com CzP-SF.

Portanto, ainda que o tempo de saturação das misturas com CzP-SF seja maior, isto se deve somente ao fato de estas misturas absorverem mais água. As misturas com CzP-SF absorvem mais água e em menos tempo do que as misturas com AGR-SF.

A menor e mais lenta saturação das misturas com maiores teores de AGR-SF (para uma mesma quantidade de água) pode ser explicada pelas características de seus poros. Acredita-se que a forma angular das partículas de AGR-SF diminuem sua conectividade e aumentam sua tortuosidade. Quanto menor a conectividade dos poros, menor será o grau de saturação desse material em relação a sua saturação teórica calculada e quanto maior a tortuosidade, maior o tempo de absorção, pois a água encontra maior dificuldade para penetrar os poros.

Quanto à inversão das velocidades das misturas com AGR-SF, acredita-se que inicialmente, a maior tortuosidade dos poros das misturas com maiores teores de AGR-SF diminui as velocidades. Entretanto, quando os poros já estão parcialmente preenchidos e a absorção é comandada pela porosidade dos grãos, que é maior nas misturas com maiores teores de AGR-SF, as velocidades dessas misturas aumentam. Nesse caso, se considera a hipótese de que, embora a absorção dos grãos e dos capilares se dê simultaneamente, a saturação dos poros abertos dos grãos se dá um pouco depois que a saturação dos capilares.

O menor grau de saturação das misturas com maiores teores de AGR-SF pode ser observado na figura 51 que apresenta a média dos graus de saturação dos três estados de compactação de cada mistura em função do teor de substituição.



**Figura 51: Grau de saturação x Teor de substituição.**

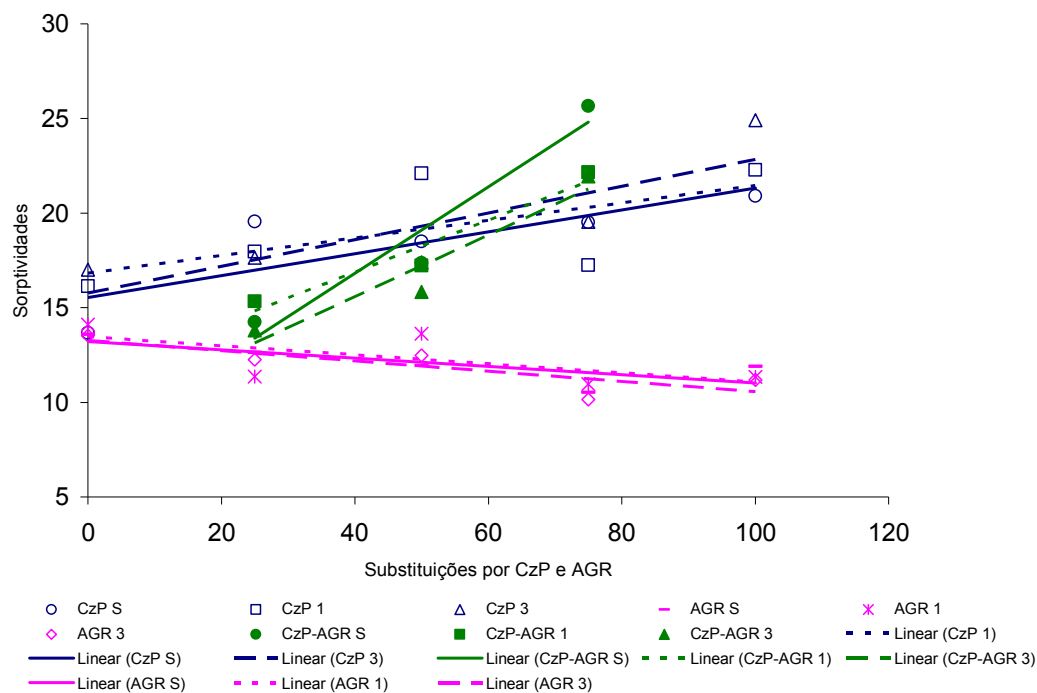
- Sorptividades- Resultados.**

A figura 52 apresenta as sorptividades das composições granulares em todos os seus estados de compactação.

As sorptividades das misturas com CzP-SF e das misturas com AGR-SF não apresentaram um comportamento gradativo, mas os resultados sugerem uma tendência do aumento da sorptividade, com o aumento do teor de CzP-SF, nas misturas com CzP-SF e uma diminuição da sorptividade com o aumento do AGR-SF, nas misturas com o agregado reciclado.

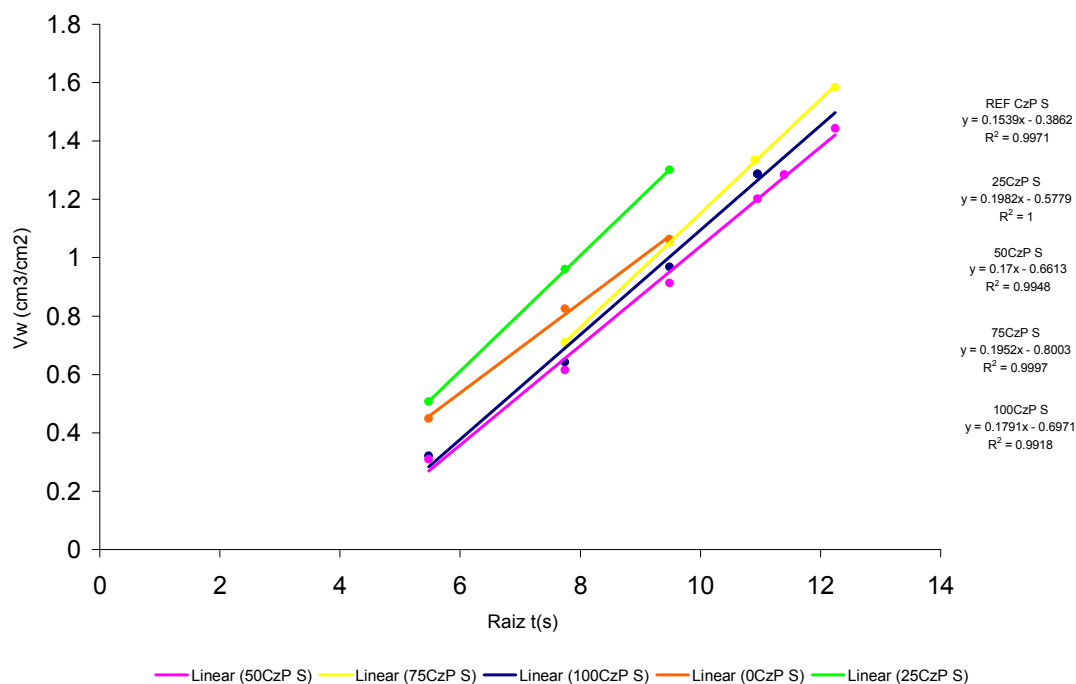
Nas misturas entre AGR-SF e CzP-SF, as sorptividades mostraram um aumento gradativo, com o aumento do teor de CzP-SF.

Pelo gráfico observa-se que, entre os graus de compactação de uma mesma mistura, não houve um comportamento gradativo das sorptividades.

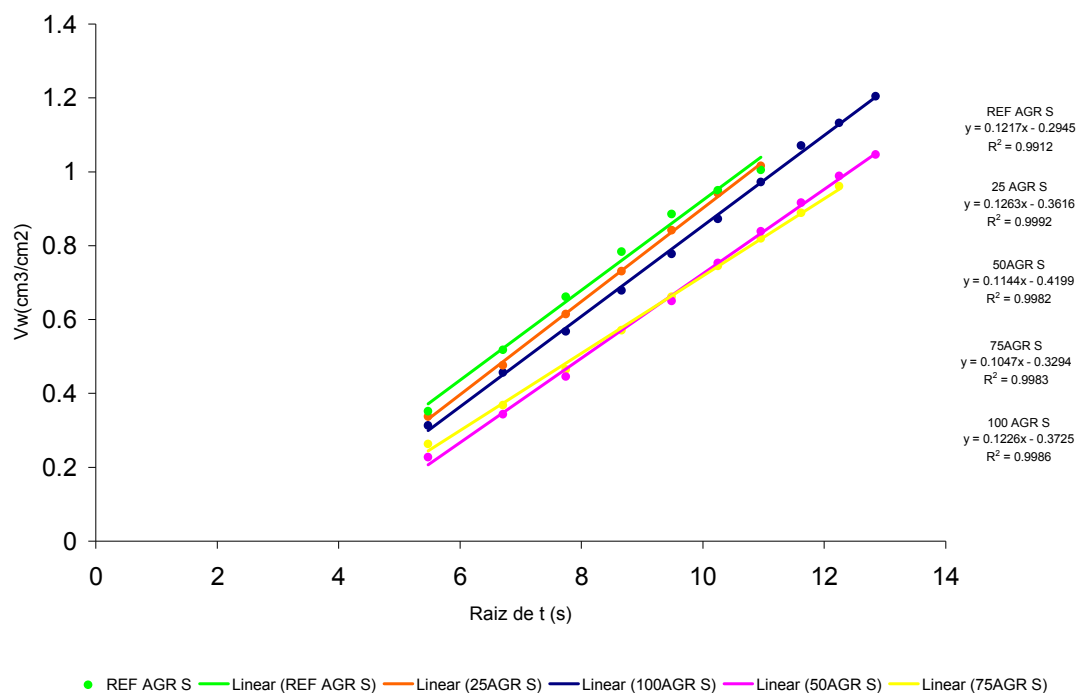


**Figura 52: Sorptividade x teor de substituições.**

As figuras 53 e 54 apresentam as retas a partir das quais foram extraídas as sorptividades das misturas com CzP-SF e com AGR-SF. Para facilitar a visualização, foram consideradas somente as misturas no estado solto.

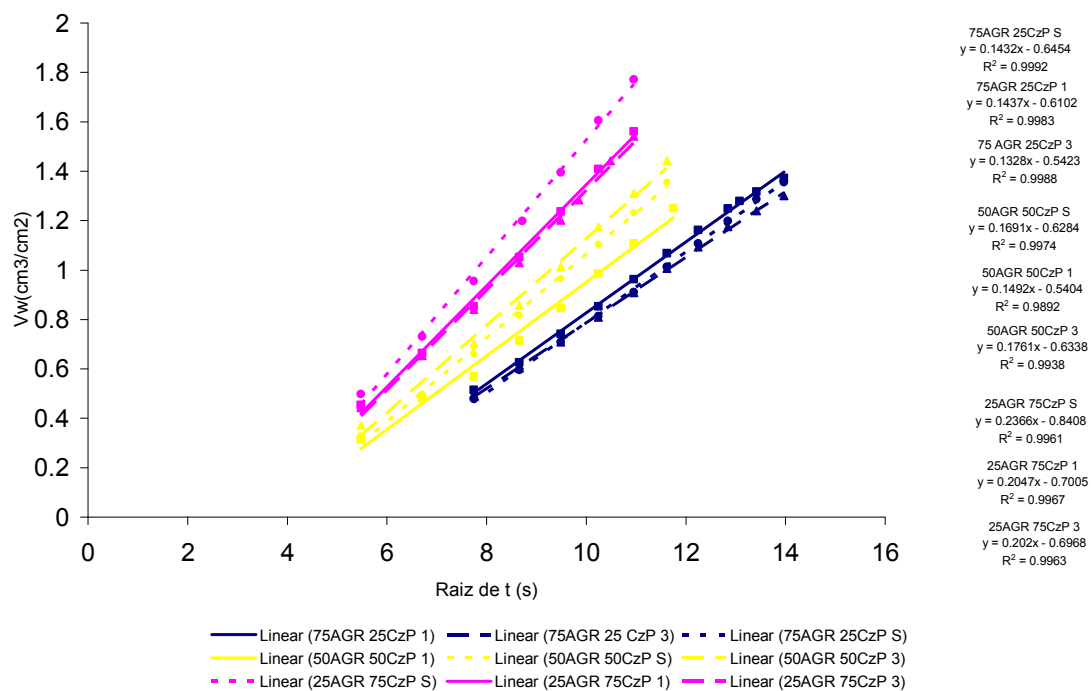


**Figura 53: Volume de água pela secção da amostra x raiz do tempo- Misturas com CzP-SF.**



**Figura 54: Volume de água pela secção da amostra x raiz do tempo- Misturas com AGR-SF.**

A figura 55 apresenta as retas a partir das quais foram extraídas as sorptividades das misturas entre AGR-SF e CzP-SF.



**Figura 55: Volume de água pela secção da amostra x raiz do tempo- Misturas com CzP-SF e AGR-SF.**

- **Sorptividade - Análises e Considerações.**

Considerando que o volume de água absorvido das misturas com AGR-SF aumentou com o aumento do teor de agregado, era esperado que a sorptividade dessas misturas também aumentassem. Entretanto este fato não foi observado. A absorção mais lenta dessas misturas foi um indício desses resultados.

Sendo a sorptividade, um parâmetro que relaciona a absorção capilar do material no tempo e que é influenciado pela porosidade, conectividade e tortuosidade dos poros, algum ou alguns desses parâmetros influenciaram contrariamente a sorptividade das misturas, no que se refere à absorção ou ao tempo de absorção.

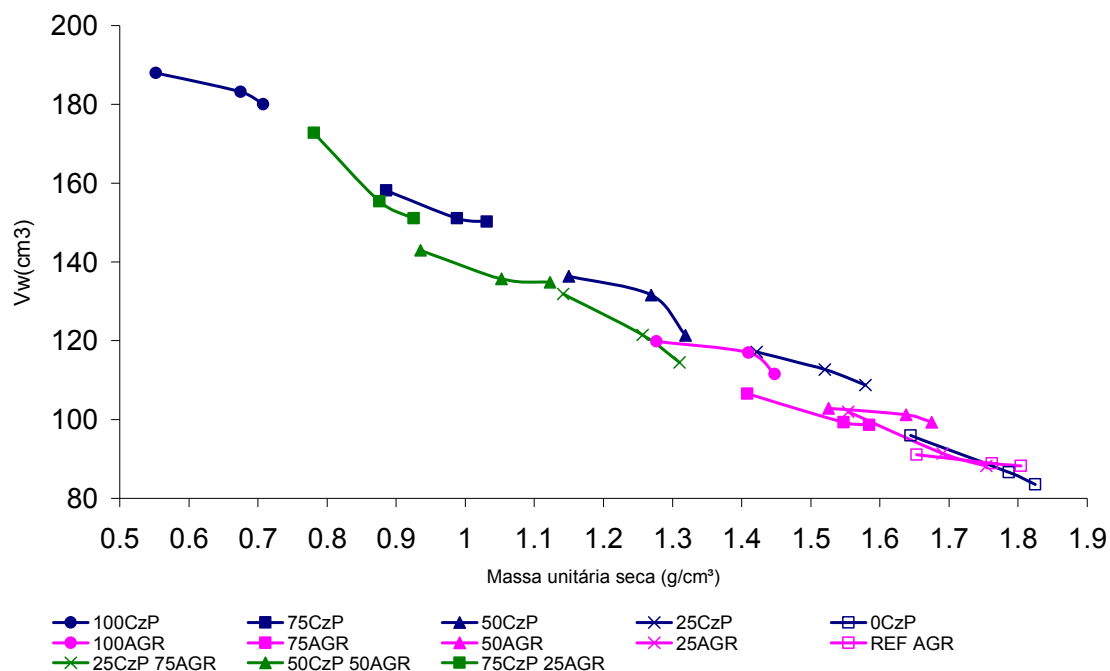
Como a quantidade de água absorvida aumentou com o aumento de AGR-SF na mistura, em função da quantidade dos poros, acredita-se que a diminuição da sorptividade foi devido ao tempo de absorção das misturas (que se mostraram maiores), em função de um aumento do fator tortuosidade, causado pela forma dos grãos do AGR-SF.

Como comentado anteriormente, o aumento da tortuosidade dificulta a passagem da água, pelo meio poroso e diminui sua velocidade.

- **Relação com parâmetros físicos**

No ensaio de absorção capilar a água, quanto menor a massa unitária da amostra, maior a quantidade de água absorvida, como mostra a figura 56. Entretanto, a absorção de água não depende somente da massa unitária das misturas, que é resultado da porosidade dos grãos e da amostra, mas também da conectividade e tamanho desses poros, como comentado anteriormente.

A figura 56 mostra, por exemplo, a mistura de 50CzP-50REF com valores de massa unitária similares aos da mistura de 25CzP-75AGR, mas com uma absorção de água maior, em todos os seus estados de compactação. Ao que parece, embora com porosidade semelhante, a estrutura formada pela mistura de 25CzP-75AGR possui outra estrutura de poros. Uma hipótese é a de que exista menos poros conectados. A forma lamelar e angular do AGR, presente em maior quantidade nessa composição propiciaria essa condição.



**Figura 56: Volume de água x Massa unitária.**

Outra possibilidade é a menor presença de poros capilares por onde se dá absorção capilar. Esta última consideração é explicada pela distribuição granulométrica mais grossa da mistura 25CzP-75AGR em relação à 50CzP-50REF. Grãos maiores, quando adensados tendem a formar poros maiores entre si. Neste caso, a igualdade nos valores da massa unitária se daria pela massa dos grãos (maior para o AGR) quando confinados em um volume e não pelo volume de sólidos preenchido pelos grãos.

#### 4.3.3 Secagem ao ar

São apresentados e analisados a seguir, os resultados do ensaio de secagem ao ar das misturas utilizadas na pesquisa.

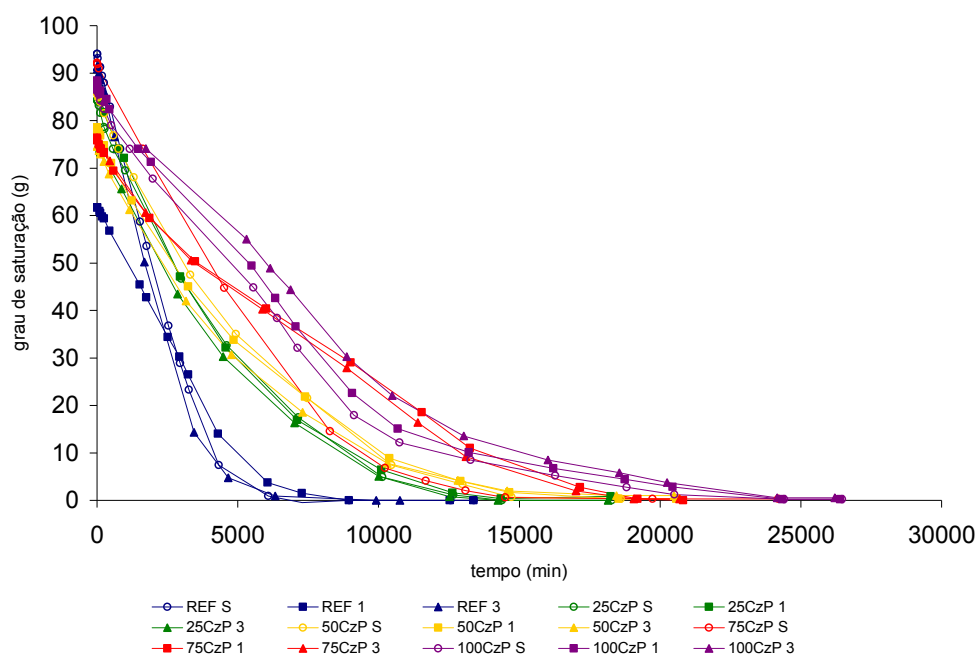
As amostras não apresentaram o mesmo grau de saturação inicial, como pode ser visto nas figuras 57, 59 e 61, em razão de possuírem graus de saturação final diferentes, na absorção. Durante a retirada das amostras para o ensaio de secagem ao ar a partir das amostras de absorção, parte da umidade foi perdida, o que ficou evidenciado pelas misturas não apresentarem saturação inicial igual à saturação final de absorção.

- **Secagem ao ar - Resultados**

- **Misturas com CzP-SF.**

Considerando o grau de saturação máximo de cada mistura, as misturas com maiores teores de CzP-SF mostraram uma tendência de graus de saturação maiores, e um

tempo de secagem maior, o que pode ser explicado pela maior quantidade de água no interior dessas amostras. A figura 57 mostra o tempo de secagem das misturas com CzP-SF em função do seu grau de saturação inicial.



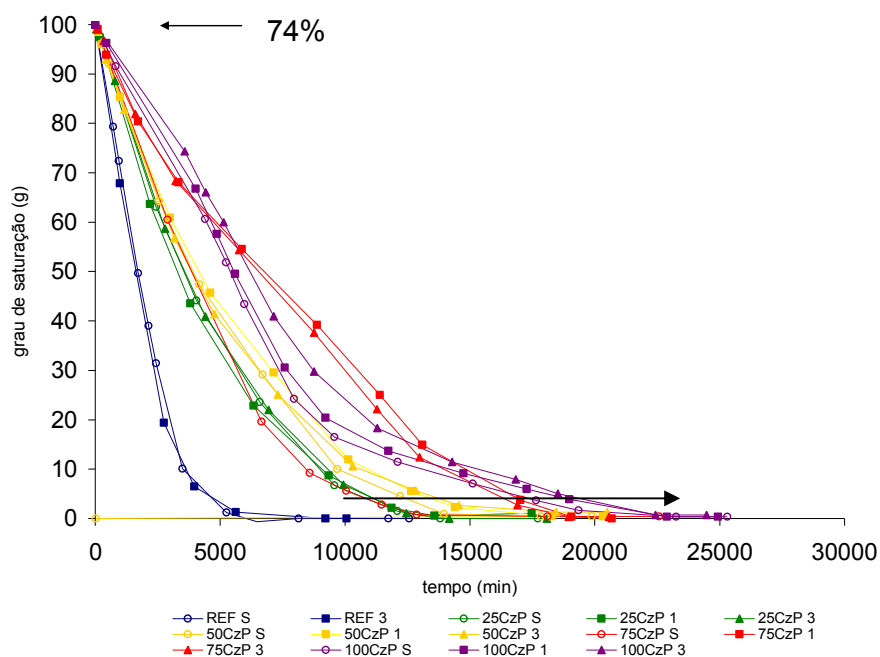
**Figura 57: Grau de saturação x tempo-misturas com CzP-SF.**

Considerando uma saturação comum a todas as misturas, as composições com CzP-SF, foram avaliadas com grau de saturação de 74% (figura 58). Ainda assim, aquelas com maiores teores de cinza têm um tempo de secagem maior.

Comparou-se as misturas com 100% de Cinza com as misturas de referência, que apresentaram um tempo de secagem de aproximadamente oito dias. As misturas com 100% de CzP-SF apresentaram, em média, um tempo de secagem 127% maior (aproximadamente 10 dias a mais). Ainda que com o mesmo grau de saturação, as amostras com CzP-SF ainda possuem água interna em maior quantidade.

Entendeu-se que amostras com CzP-SF possuem maior tempo de secagem em função da presença de água dentro dos seus poros ser maior que nas misturas com menores teores de cinza. Entretanto, o maior tempo de secagem não é somente em função de sua maior porosidade, e portanto maior quantidade de água entre os poros. Essas misturas, quando comparadas, a um mesmo grau de saturação, para uma dada variação de tempo, indicam velocidades de secagem menores. A figura 58 apresenta as misturas com CzP-SF com saturação de 74%.



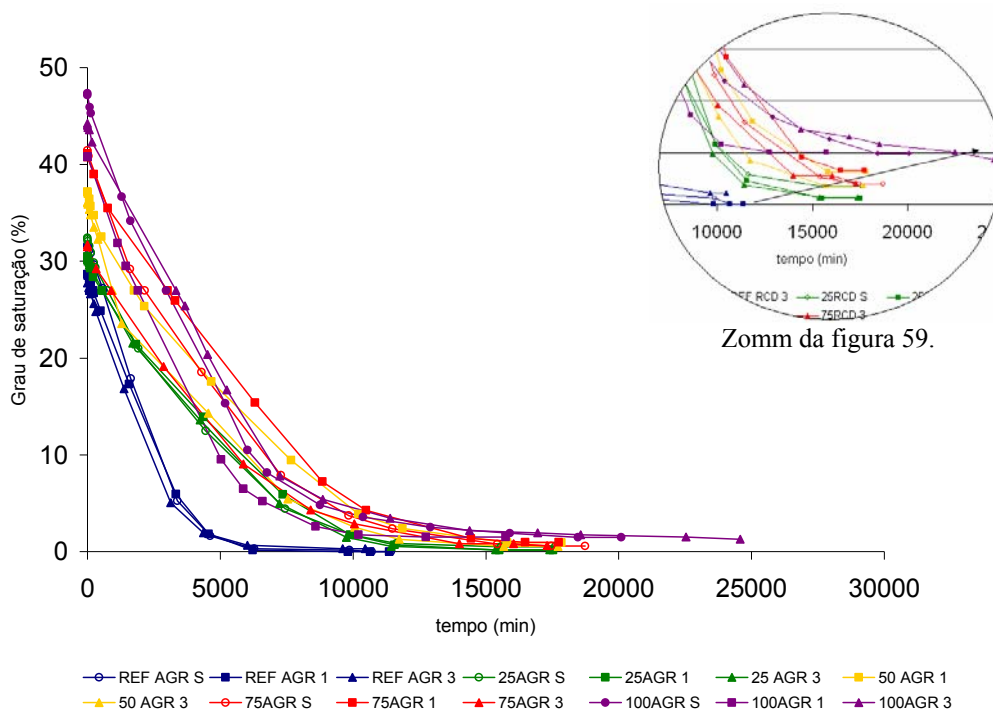


**Figura 58: Grau de saturação 74% x tempo- misturas com CzP-SF.**

#### ○ Misturas com AGR-SF.

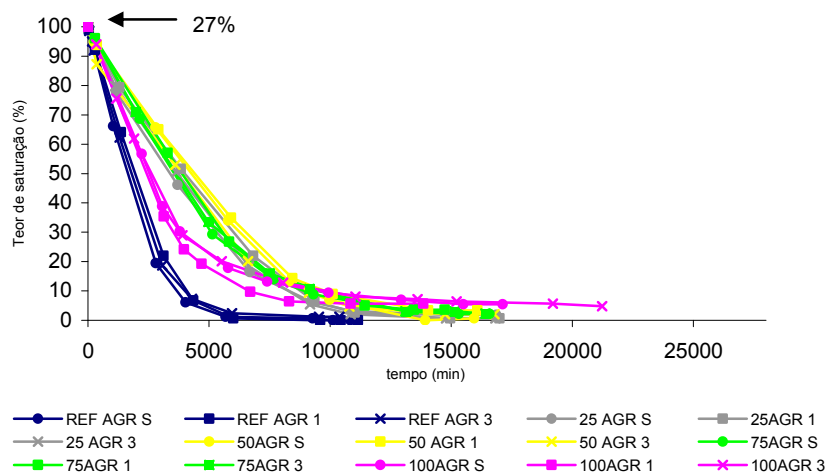
Considerando o grau de saturação máximo das misturas, as misturas com maiores teores de AGR-SF, também mostraram tendência de graus de saturação maiores, e tempo de secagem maior devido à maior quantidade de água no interior dessas amostras.

Nas misturas com agregado reciclado, quanto maior o teor de AGR-SF, maior a umidade residual nas amostras, após o ensaio, o que confirma a maior tortuosidade dos poros dessas misturas, dificultando a saída da umidade. Enquanto as misturas referência perderam 100% de sua umidade durante o ensaio, as misturas com 100% de AGR-SF mantiveram uma umidade residual, em média, de 1,5% como pode ser observado na figura 59.



**Figura 59: Graau de saturação x tempo- misturas com AGR-SF.**

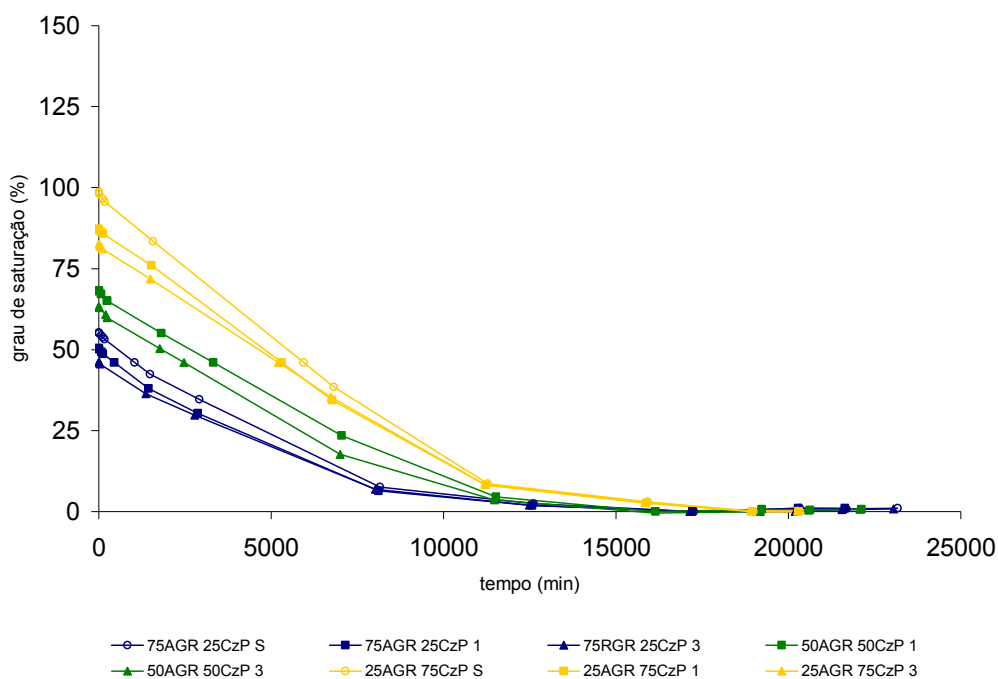
O mesmo comportamento, de maior tempo de secagem, foi constatado nas composições com AGR-SF, considerado um grau de saturação de 27%. As misturas com 100% AGR-SF secaram, em média, em doze dias, aproximadamente, quatro dias a mais que as composições de referência o que corresponde a uma aumento de 50% no tempo de secagem. A figura 60 apresenta as misturas com AGR-SF com saturação de 27%.



**Figura 60: Graau de saturação 27% x tempo- misturas com AGR-SF.**

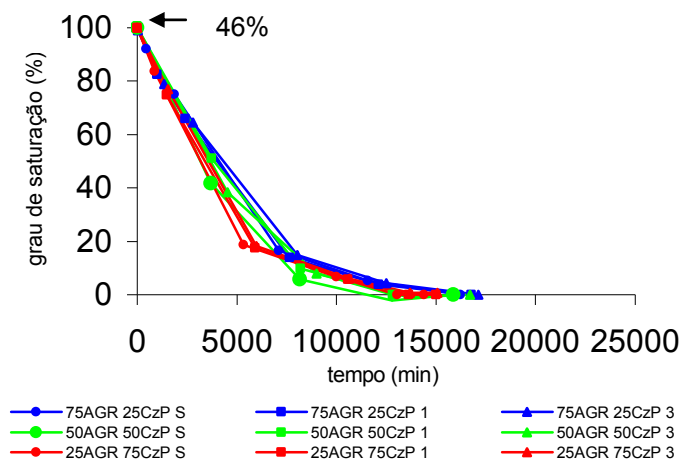
○ **Misturas entre CzP-SF e AGR-SF.**

Nas misturas entre a CzP-SF e o AGR-SF, o tempo de secagem aumentou com o aumento de CzP-SF na composição, conforme mostra a figura 61.



**Figura 61: Grau de saturação x tempo- misturas entre CzP-SF e AGR-SF.**

O tempo de secagem nas composições entre o AGR-SF e a CzP-SF, para um grau de saturação de 46%, também aumentou com o aumento do teor de CzP-SF. As velocidades nas misturas entre CzP-SF e AGR-SF reduziram com o aumento do AGR-SF, quando considerada uma dada variação de tempo. Em 5000 mil minutos (aproximadamente 3,5 dias) As misturas com 75% de AGR-SF perderam 58% de saturação enquanto que as misturas com 25% de AGR-SF perderam, em média, 72,5%. A figura 62 apresenta as misturas CzP- AGR com saturação de 46%.

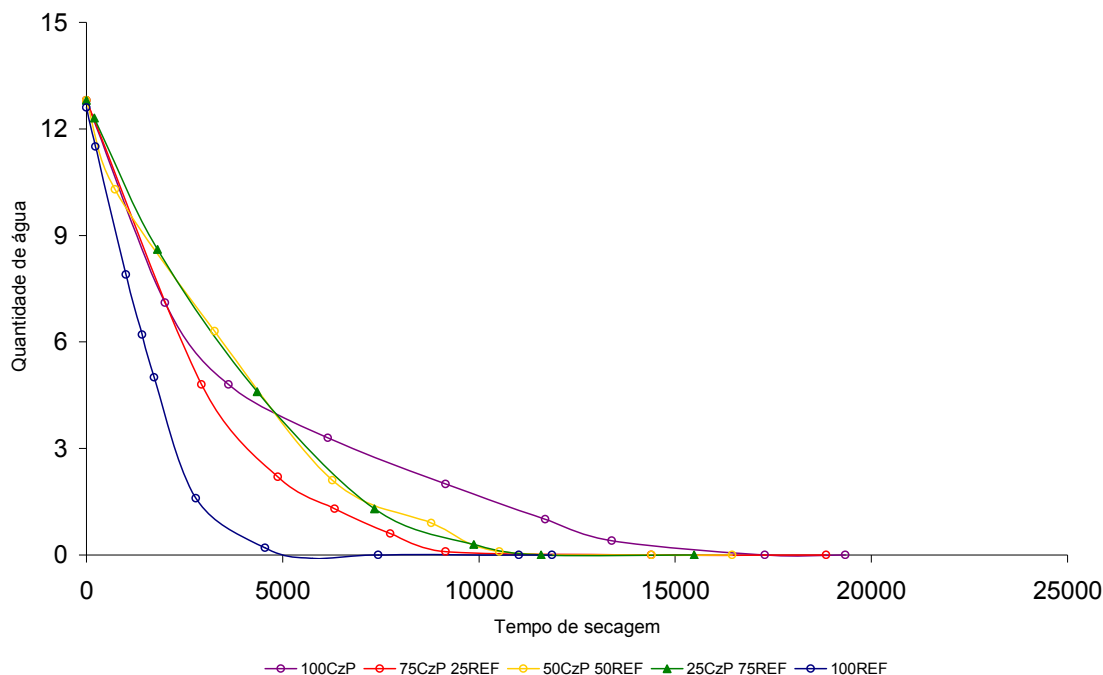


**Figura 62: Grau de saturação 46% x tempo- misturas entre a CzP-SF e AGR-SF.**

- **Secagem ao ar- Análises e Considerações.**

A água presente na amostra é encontrada nos seus poros e nos poros do grão da amostra. Entretanto, para uma areia IPT padrão, com absorção muito baixa, boa parte da água perdida estaria no capilar.

Considerando uma mesma quantidade de água nas misturas tomou-se como exemplo a mistura de 100% CzP-SF S com 12,8g de água em seu interior, correspondente 32,14% de saturação e com tempo de secagem de 19341 minutos (aproximadamente 13 dias). A REF CzP-SF S, com a mesma quantidade de água interna e grau de saturação de 58%, apresenta um tempo de secagem de 11850 minutos (8,2 dias), uma redução de 32,8%. A figura 63, mostra as misturas com CzP-SF no estado solto, com a mesma quantidade de água interna.



**Figura 63: Secagem das argamassas com CzP-SF.**

Para uma mesma quantidade de água no interior das amostras, a velocidade das misturas com CzP-SF é menor, ou seja, a perda de saturação é mais lenta. Isso mostra que seu maior tempo de secagem não se dá simplesmente pela maior quantidade de água presente e sim pela maior quantidade de água presente dentro dos grãos.

Mesmo quando se considera uma mesma quantidade de água dentro das amostras, essa água está em locais diferentes (dentro dos grãos ou nos capilares). Nas amostras mais porosas, a quantidade de água dentro dos grãos, mais difícil de ser liberada, é maior, por isso a secagem é mais lenta.

#### **4.4 Propriedades das argamassas no estado fresco.**

Os resultados apresentados a seguir, são referentes aos ensaios realizados nas argamassas utilizadas na pesquisa, cujas misturas e métodos de ensaio foram apresentados no programa experimental.

##### **4.4.1 Massa específica aparente (NBR 13278/05) - Resultados.**

As massas específicas aparentes no estado fresco das argamassas produzidas com agregados mais leves apresentaram valores menores do que aquelas confeccionadas com

areia IPT. A tabela 13 apresenta os valores de massa específica encontrados e a figura 64 mostra a relação entre essa propriedade e o teor de substituição das argamassas.

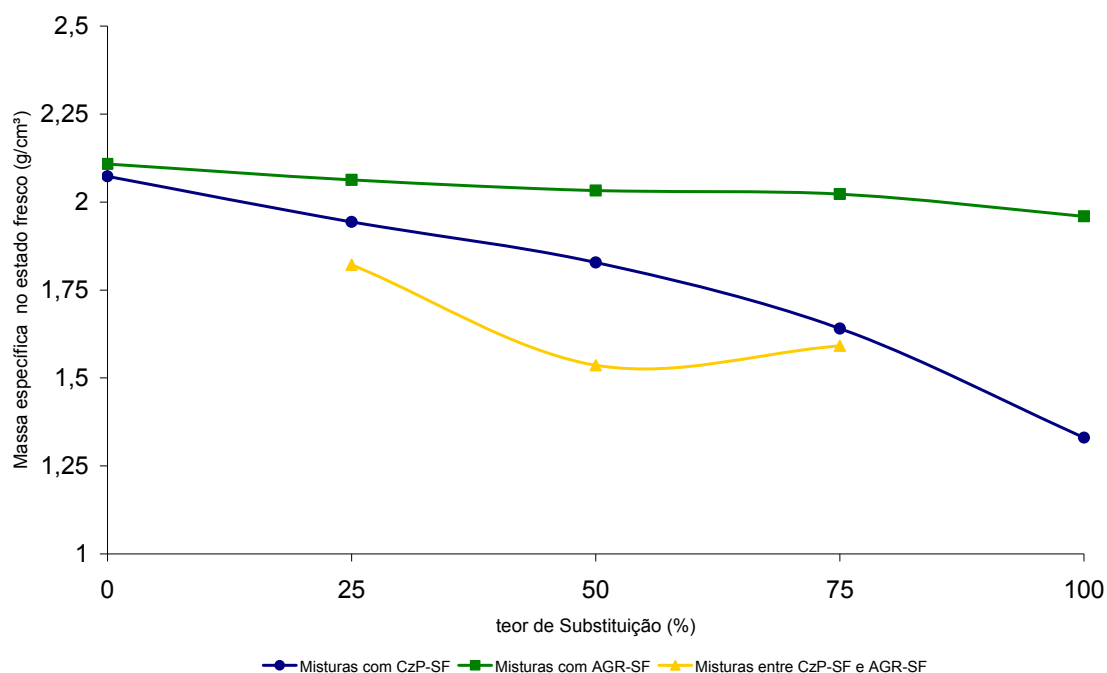
**Tabela 13: Massas específicas no estado fresco**

Mistura	Massa específica fresca(g/cm³)	Mistura	Massa específica fresca(g/cm³)	Mistura	Massa específica fresca(g/cm³)
100 REF CzP	2,07	100 REF AGR	2,10		
75REF 25CzP	1,94	75REF 25AGR	2,06	75CzP 25AGR	1,59
50REF 50CzP	1,83	50REF 50AGR	2,03	50CzP 50AGR	1,53
25REF 75CzP	1,64	25REF 75AGR	2,02	25CzP 75AGR	1,82
100CzP	1,33	100AGR	1,95		

Para as misturas com CzP-SF, houve uma redução de 35,7% na massa específica da argamassa com 100CzP, quando comparada a argamassa de referência.

Para as argamassas com AGR-SF, essa redução foi de apenas 7,14%, quando a 100AGR foi comparada à referência, devido à massa específica do AGR-SF ser igual à massa específica da areia IPT.

Nas misturas entre CzP-SF e AGR-SF, houve uma redução de 12,6% na massa específica da argamassa 75CzP-25AGR quando comparada à argamassa 25CzP-75AGR.



**Figura 64: Massa específica aparente no estado fresco x teor de substituição.**

- **Massa específica aparente (NBR 13278/05) – Análises e Considerações.**

As argamassas CzP-AGR apresentaram massa específica menor que as massas específicas das misturas de CzP-SF e AGR-SF, nos teores de 25%, 50% e 75%. Este

fato se explica por dois motivos: nessas porcentagens das misturas de CzP-SF e AGR-SF, o outro material que compõe as misturas é a areia IPT, de massa específica maior que a da CzP-SF e do AGR-SF; a forma do grãos de AGR-SF podem dificultar o adensamento da mistura.

- **Relação com propriedades hidrodinâmicas do material granular**

A massa específica aparente fresca das argamassas foi relacionada com a absorção de água dos grãos das misturas CzP, AGR e CzP-AGR na figura 65. Os valores das absorções de água das misturas foram obtidos a partir dos valores de absorção dos materiais que compõem as misturas e de suas porcentagens.

Como esperado, foi observado uma relação de dependência entre a massa específica aparente fresca das argamassas e a absorção de água dos grãos dos materiais utilizados, pois os grãos absorvem parte da água destinada à mistura, que perde trabalhabilidade e prejudica seu adensamento.

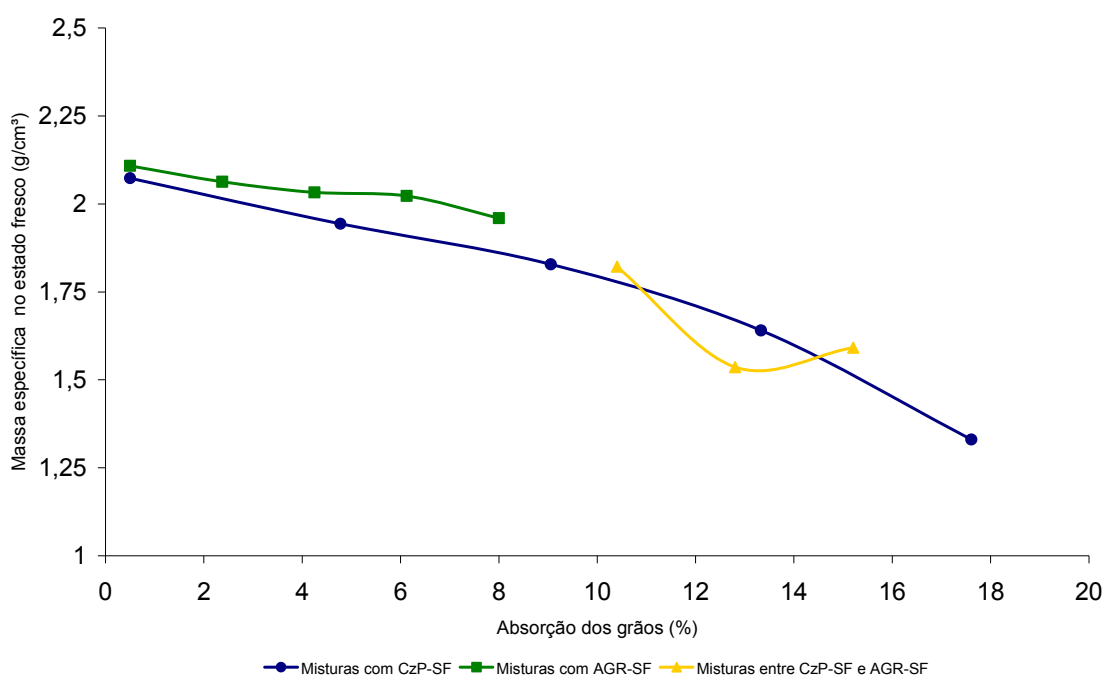


Figura 65: Massa específica no estado fresco ( $\text{g/cm}^3$ ) x Absorção de água dos grãos(%).

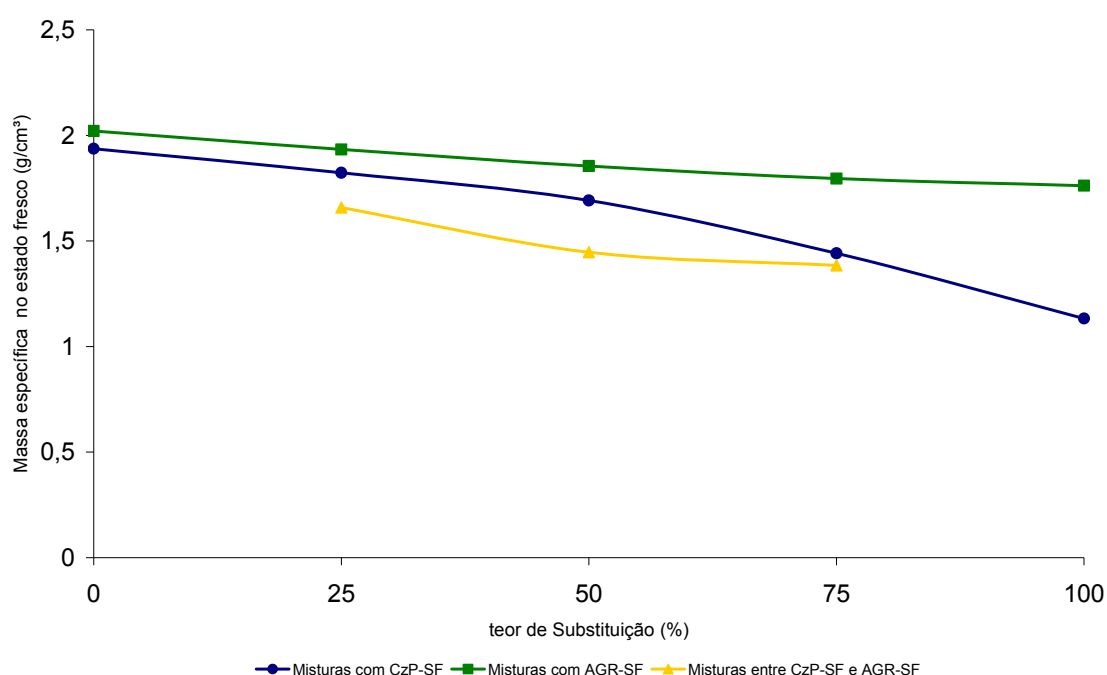
## 4.5 Propriedades físicas das argamassas no estado endurecido

### 4.5.1 Massa específica aparente – Resultados.

A massa específica aparente no estado endurecido das argamassas apresentou-se em conformidade com os resultados encontrados no estado fresco. Quanto maior o teor

de substituição da areia IPT por agregados mais porosos, menor o valor da massa específica. Nas argamassas com CzP-SF, este parâmetro diminuiu 41,45% quando a mistura com 100% de cinza foi comparada à misturas de referências das argamassas com CzP-SF. Nas argamassas com AGR-SF essa redução foi de aproximadamente 13 %, quando a 100AGR foi comparada sua referência foram comparadas.

O gráfico da figura 66 apresenta a relação entre as massas específicas aparentes secas das misturas e o teor de substituição. Pode ser observado uma queda na inclinação da reta de massa específica em função do teor de CzP-SF para as argamassas com 75% e 100% de CzP-SF.



**Figura 66: Massa específica aparente seca x teor de substituição.**

A tabela 14 de variação de massa mostra o aumento significativo da diferença de massa específica a partir da argamassa com teor de CzP-SF de 75%. Nas misturas com AGR-SF, houve um comportamento contrário.

**Tabela 14: Variação de massa específica entre as misturas**

Mistura	Variação de massa entre misturas	Mistura	Variação de massa entre misturas
100CzP-75 CzP	0,30	100AGR- 75AGR	0,03
75CzP- 50CzP	0,25	75AGR- 50AGR	0,06
50CzP-25CzP	0,13	50AGR- 25AGR	0,08
25CzP- REF CzP	0,11	25AGR- REF AGR	0,09



- **Massa específica aparente- Análises e Considerações**

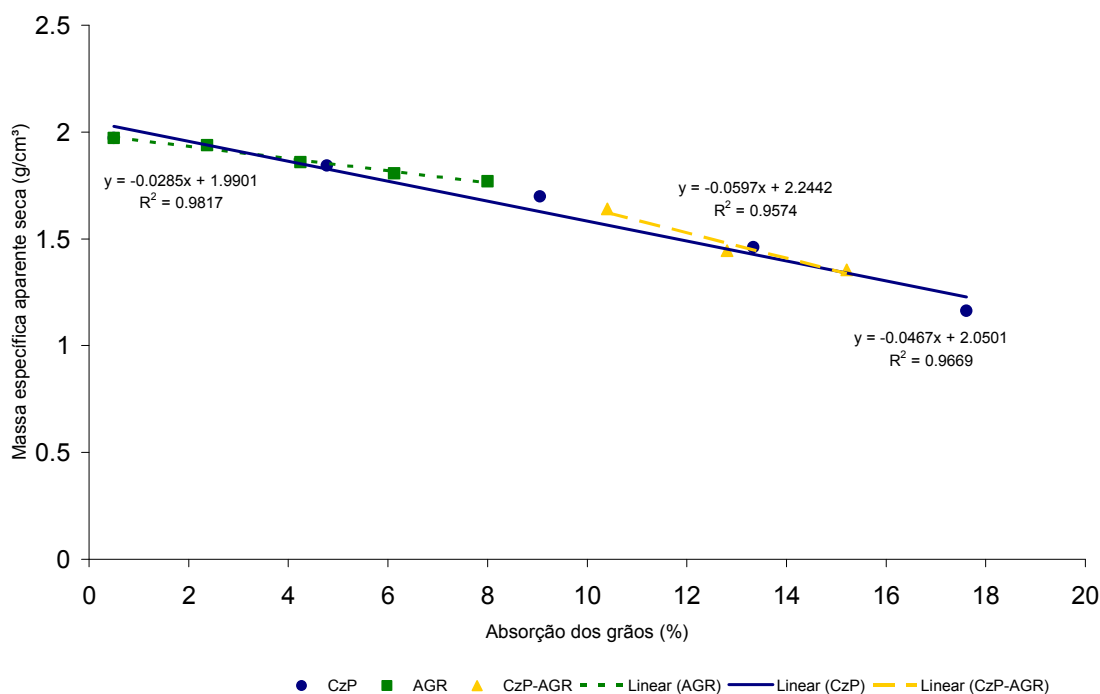
A redução da massa específica com o aumento do teor de substituição já era esperada em função da menor massa unitária dos agregados de substituição.

A princípio a forma do AGR-SF, favoreceu a compactação da mistura, entretanto a massa específica diminuiu, visto o AGR-SF possuir massa específica menor que a areia IPT.

- **Relação com propriedades físicas e hidrodinâmicas do material granular**

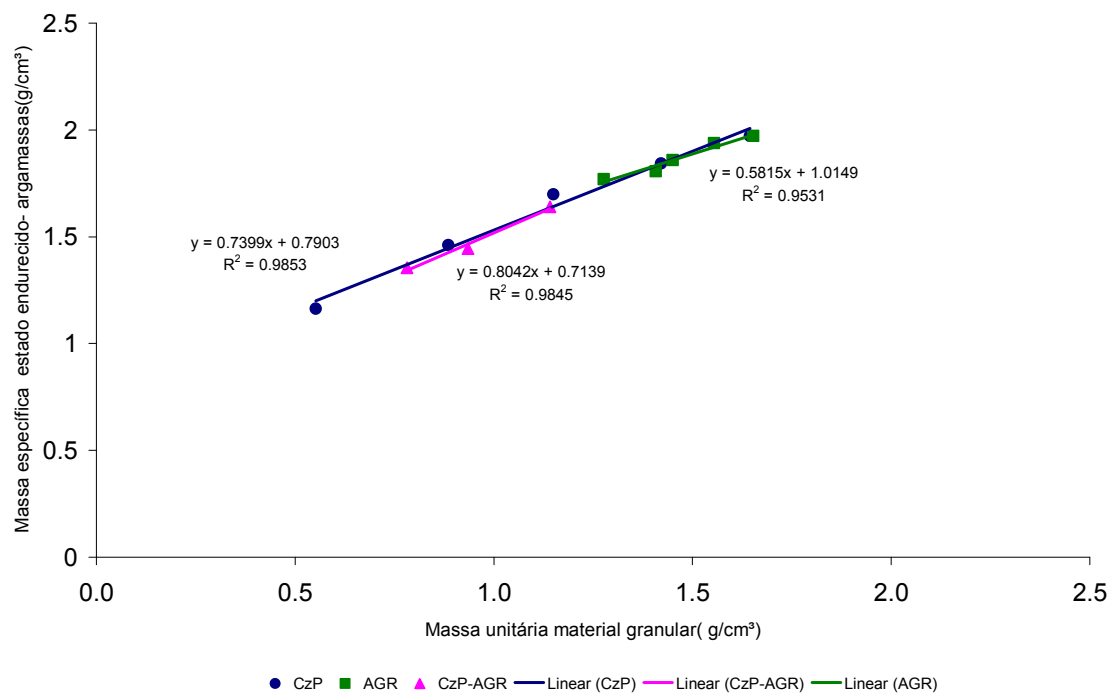
A influência de propriedades físicas e hidrodinâmicas dos agregados de resíduos utilizados, na massa específica aparente seca das argamassas, foi analisada nas figuras 67 e 68 que relacionam esta propriedade da argamassa com a absorção de água dos grãos (figura 67) e com a massa unitária das misturas (figura 68).

A figura 67 apresenta uma forte relação de dependência entre a massa específica e a absorção dos agregados. Quanto maior o teor de água absorvido pelos grãos, menor a massa específica das argamassas. Além dos grãos absorverem parte da água destinada à mistura, que perde trabalhabilidade e prejudica seu adensamento, uma menor quantidade de água fica disponível para a hidratação.



**Figura 67: Massa específica aparente seca x Absorção dos grãos.**

Como pode ser observado, na figura 68, também existe uma alta relação entre a massa unitária das misturas granulares e a massa específica aparente seca das argamassas, pois as duas propriedades consideram os mesmo parâmetros na sua determinação: a massa seca da amostra e o seu volume (no caso do material granular, do volume que o contém).

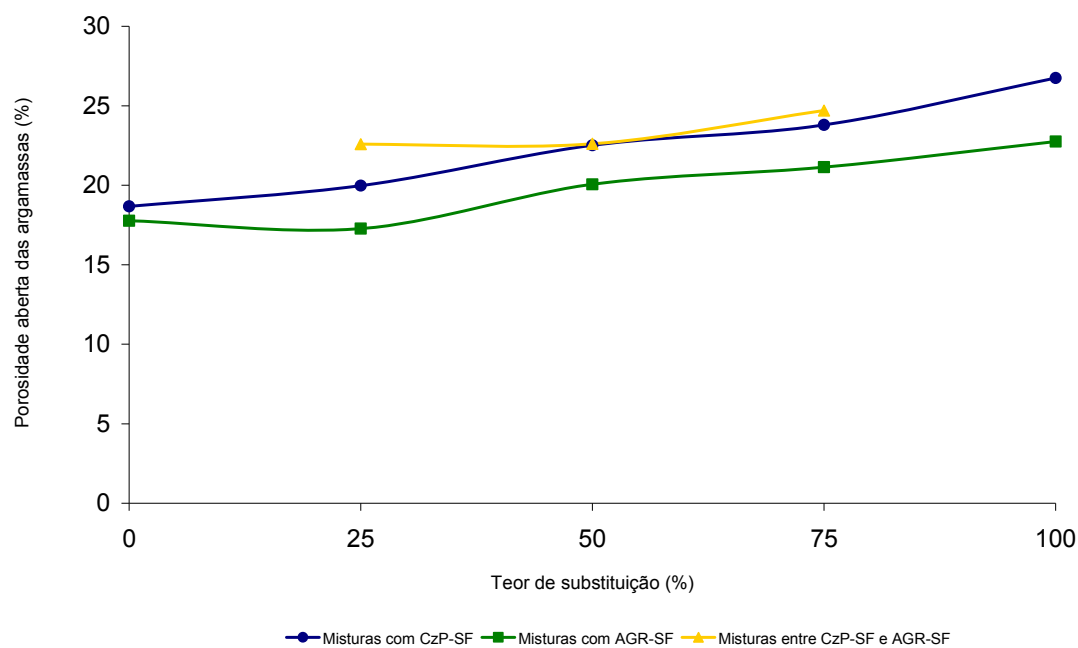


**Figura 68: Massa específica no estado endurecido x Massa unitária material granular.**

#### 4.5.2 Porosidade aberta (NBR 9778/87)- Resultados e Análises

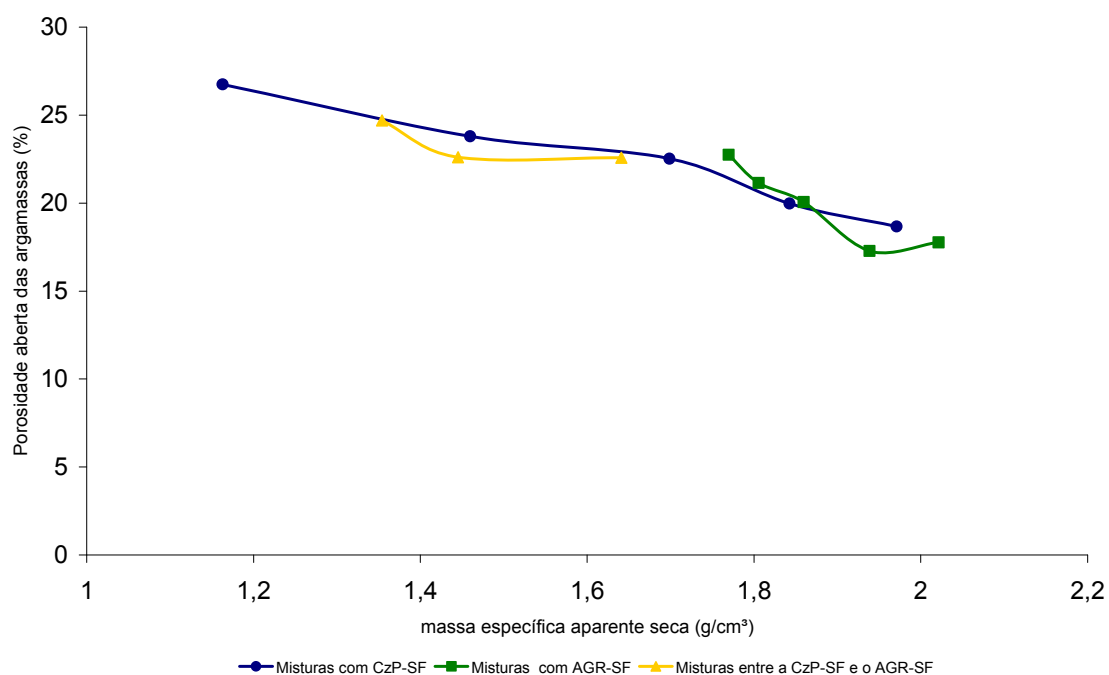
Os resultados obtidos para a porosidade aberta apresentados na figura 69, onde o volume de água absorvida, e portanto de poros, foi considerado em relação ao volume da amostra, mostram através de uma relação nítida, que quanto maior o teor de CzP-SF e AGR-SF, maior a porosidade aberta das argamassas.

A faixa de porosidade das argamassas com CzP-SF é quase duas vezes maior que a faixa de porosidade das misturas com AGR-SF.



**Figura 69: Porosidade aberta das argamassas x Teor de substituição.**

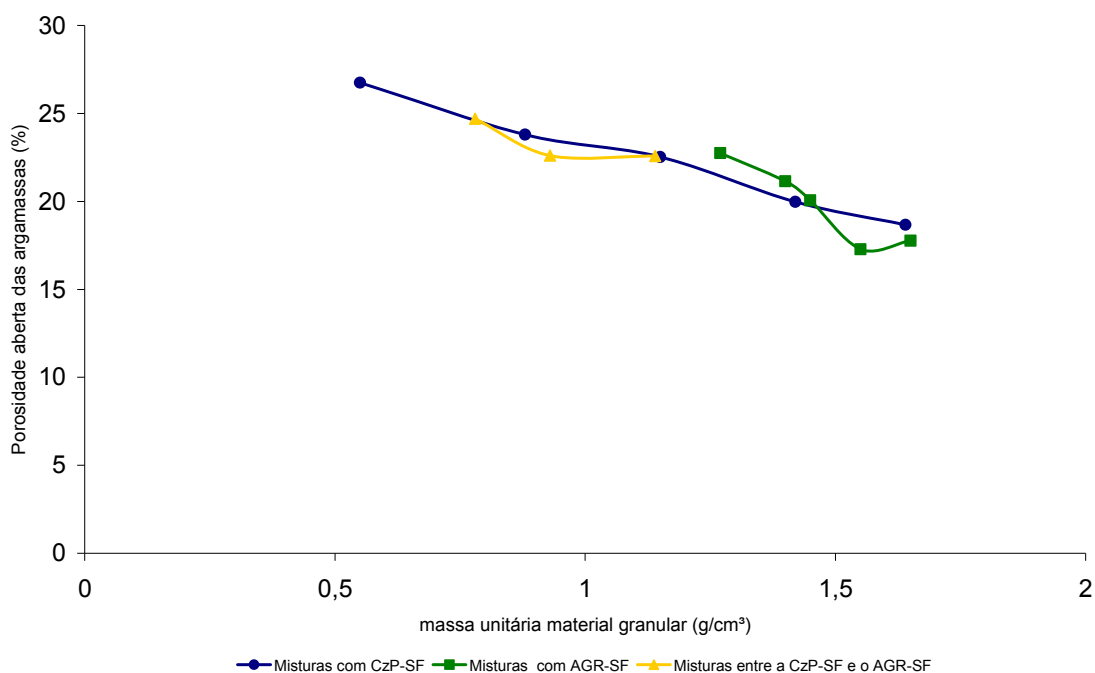
Na figura 70 é apresentada a relação de dependência entre a massa específica aparente seca e a porosidade nas argamassas. A relação entre essas propriedades em materiais porosos é conhecida e já era esperada, visto que quanto maior a porosidade da amostra, menor a sua massa, a ser dividida por um volume constante.



**Figura 70: Porosidade das argamassas x Massa específica aparente seca das argamassas.**

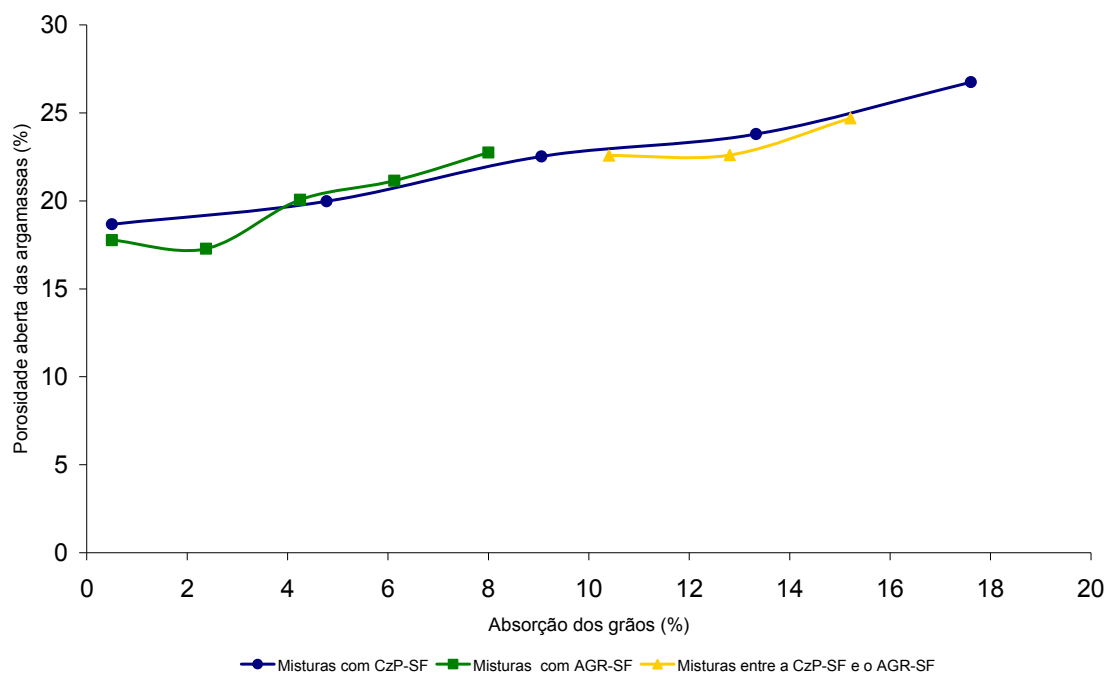
- **Relação com propriedades físicas e hidrodinâmicas do material granular**

Para avaliar a influência da estrutura porosa do material granular na estrutura porosa das argamassas, a massa unitária das misturas granulares foi relacionada com a porosidade das argamassas na figura 71. O gráfico mostra uma relação de dependência entre a porosidade das argamassas, determinada pelas características físicas dos materiais que a constituem, e a massa unitária granular das misturas.



**Figura 71: Porosidade x Massa unitária material granular (g/cm³).**

Considerando a influência da absorção dos grãos na porosidade das argamassas, estas duas propriedades foram relacionadas na figura 72, que mostra a relação de dependência entre esses dois parâmetros.



**Figura 72: Porosidade x Absorção dos grãos.**

## 4.6 Propriedades hidrodinâmicas das argamassas no estado endurecido.

### 4.6.1 Absorção capilar.

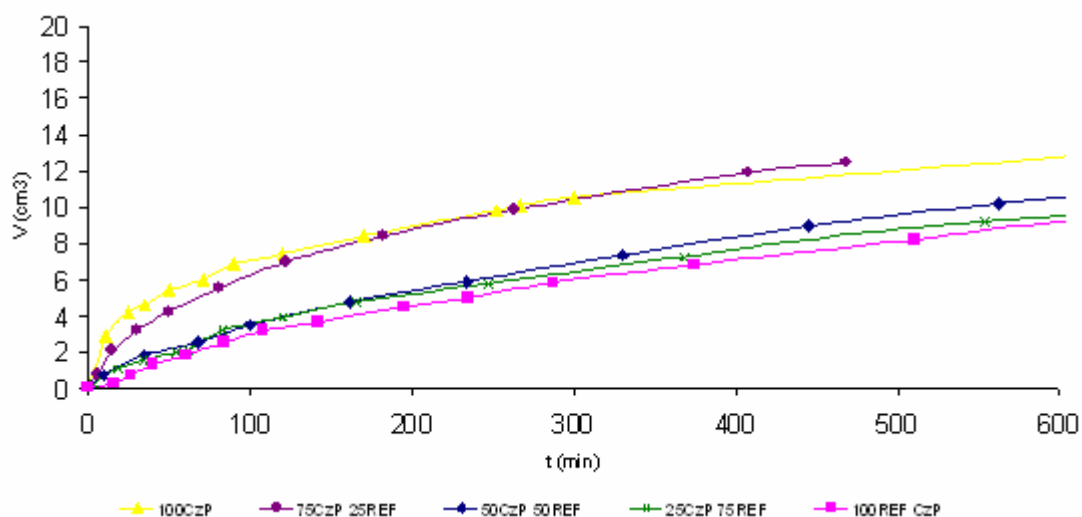
Os resultados do ensaio de absorção capilar são apresentados e analisados, a seguir, para os três tipos de mistura utilizadas na pesquisa, começando pelas absorções capilares, seguida das sorptividades das misturas.

- **Absorção capilar- Resultados.**

- **Misturas com CzP-SF.**

Nas misturas com CzP-SF, para um dado tempo, quanto maior o teor de CzP-SF nas misturas, maior o teor de água absorvida por capilaridade.

Se considerada uma quantidade igual de água absorvida a todas as misturas, aquelas com maiores teores de CzP-SF absorveram água mais rápido. A figura 73 mostra absorção de água das misturas com CzP-SF ao longo do tempo.



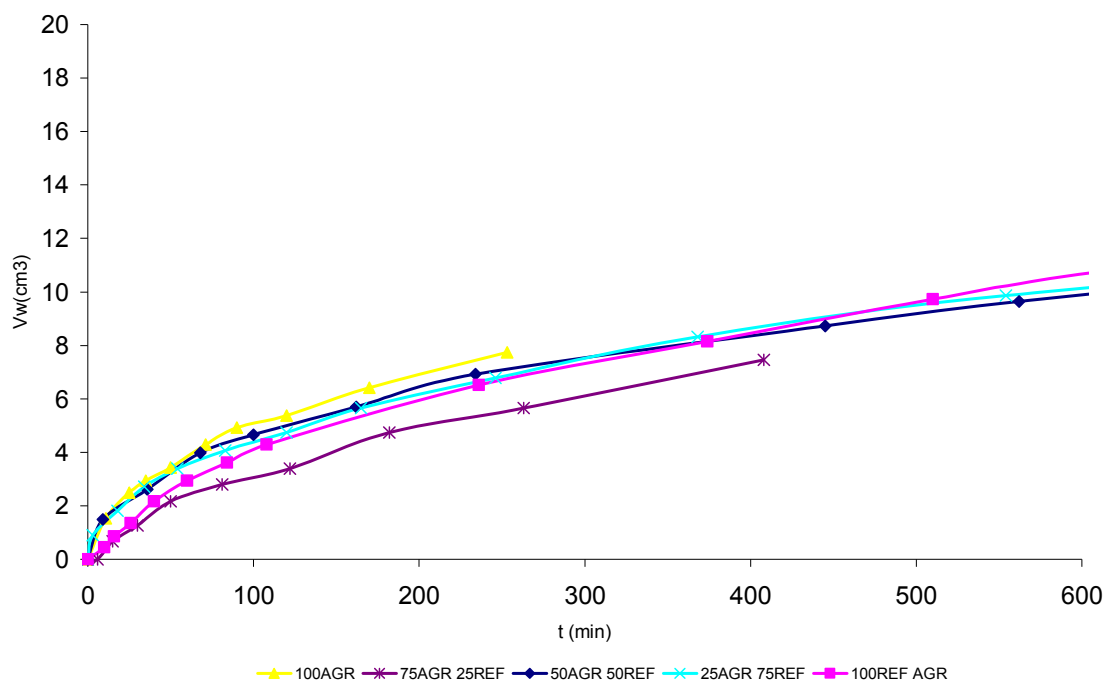
**Figura 73: Absorção de água x tempo – Misturas com CzP-SF.**

○ **Misturas com AGR-SF.**

As misturas com maiores teores de AGR-SF tenderam a absorver mais água, considerado um tempo comum a todas as misturas, com exceção da mistura com 75% de AGR-SF.

Quando considerada um mesmo teor de água absorvida a todas as misturas, aquelas com maiores teores de AGR-SF também absorveram água mais rápido.

A figura 74 mostra a absorção de água das misturas com AGR-SF ao longo do tempo.

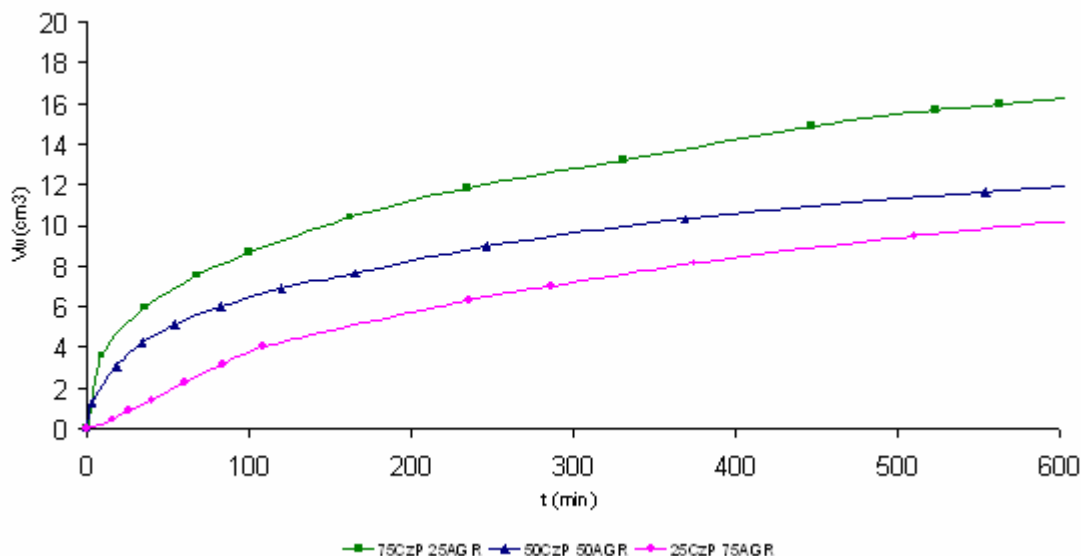


**Figura 74: Absorção de água x tempo – Misturas com AGR-SF.**

○ **Misturas entre a CzP-SF e o AGR-SF.**

Quanto maior o teor de CzP-SF, nas misturas entre CzP-SF e AGR-SF, maior a quantidade de água absorvida, para um mesmo tempo. O mesmo se repete para a quantidade de água absorvida. As misturas com maiores teores de AGR-SF absorveram mais rápido, uma mesma quantidade de água.

A figura 75 mostra a absorção de água das misturas entre CzP-SF e AGR-SF, ao longo do tempo.



**Figura 75: Absorção de água x tempo – Misturas entre a CzP-SF e o AGR-SF.**

● **Absorção capilar- Análises e Considerações.**

O aumento da porosidade influenciou o aumento da absorção de água dos três tipos de misturas analisadas. As misturas com CzP-SF absorveram mais água do que as misturas com AGR-SF, por serem mais porosas.

Quanto maior o teor de CzP-SF e AGR-SF nas misturas, maior a absorção dessas argamassas. E nas misturas entre CzP-SF e AGR-SF, aquela com maior teor de CzP-SF, absorve mais água.

Quando considerado um dado intervalo de tempo, nas argamassas com CzP-SF e entre a CzP-SF e o AGR-SF as velocidades de absorção aumentaram nas misturas com maiores teores de cinza, ou seja, argamassas com cinza pesada absorvem água mais rápido e essa velocidade aumenta com o aumento do teor de CzP-SF na mistura.

Para as argamassas com AGR-SF, essa tendência de comportamento não foi verificada, o que foi coerente com os resultados encontrados para as sorptividades, mostrados a seguir.

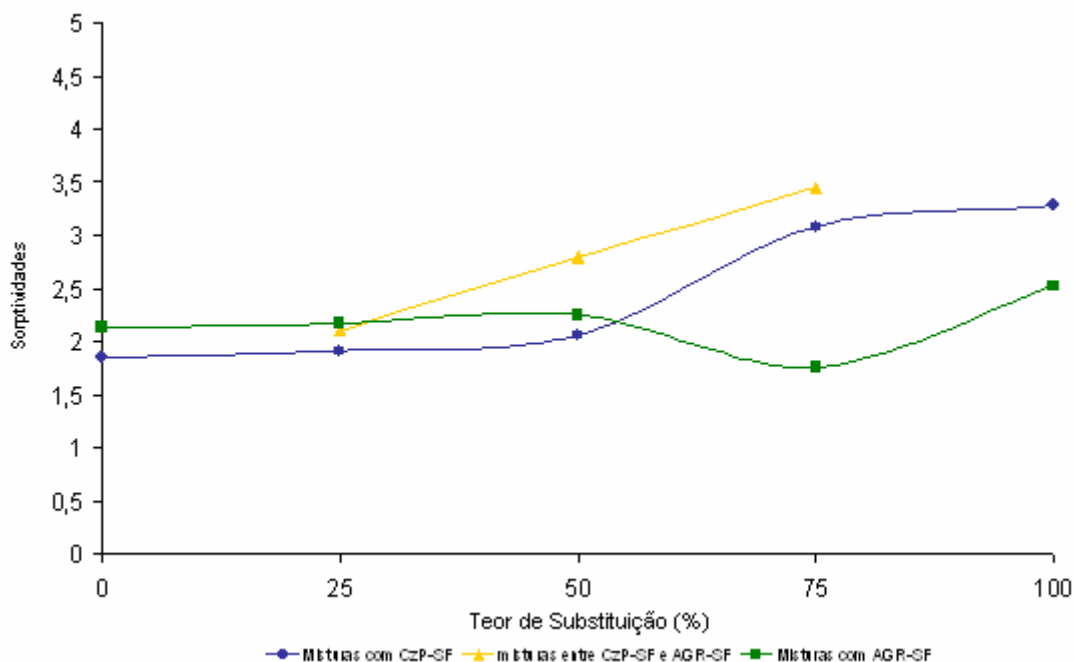
As misturas com CzP-SF absorvem mais água e com maior velocidade do que a mistura referência. Entretanto as argamassas com AGR-SF, absorvem mais água, mas a velocidades menores e a velocidade diminui com o aumento do teor de agregado reciclado na mistura. Credita-se isto ao aumento da tortuosidade e da redução de poros conectados.

- **Sorptividades- Resultados.**

A sorptividade das argamassas foi influenciada pelos teores de substituição das misturas.

Verificou-se que quanto maior o teor de CzP-SF nas argamassas, maior o coeficiente de sorptividade. O mesmo comportamento não foi gradativo para as misturas com AGR-SF, mas os resultados mostraram a tendência de sorptividades maiores com argamassas com maiores teores de AGR-SF.

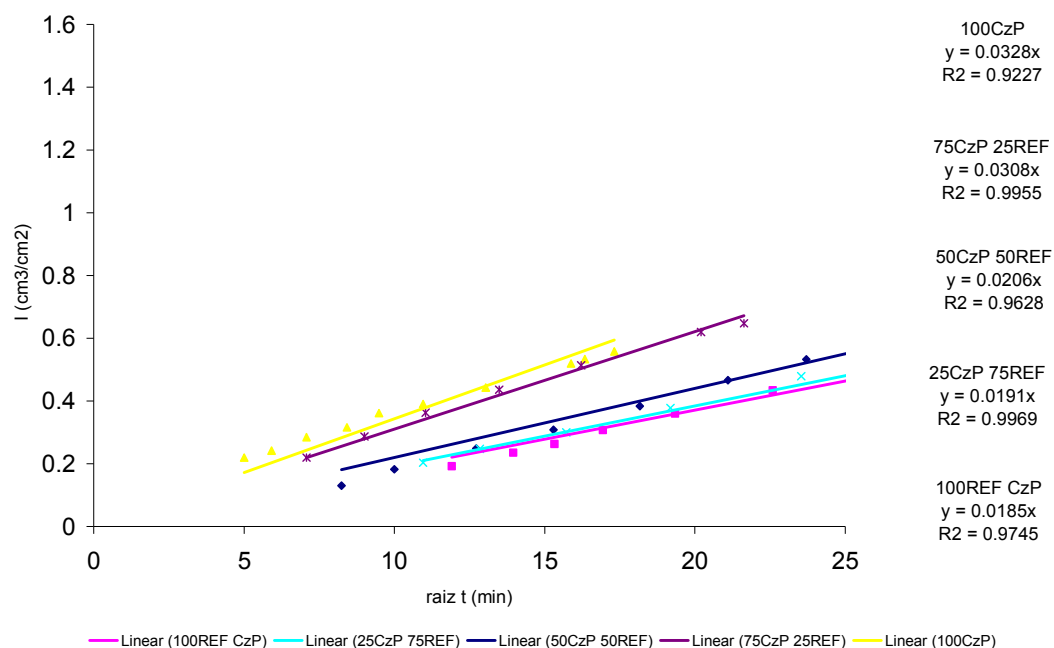
Para as misturas entre CzP-SF e AGR-SF, as sorptividades aumentaram com o aumento do teor de cinza pesada. Para as misturas com AGR-SF, esse comportamento não foi tão claro. A figura 76 apresenta as sorptividades das argamassas em função dos teores de substituição das misturas.



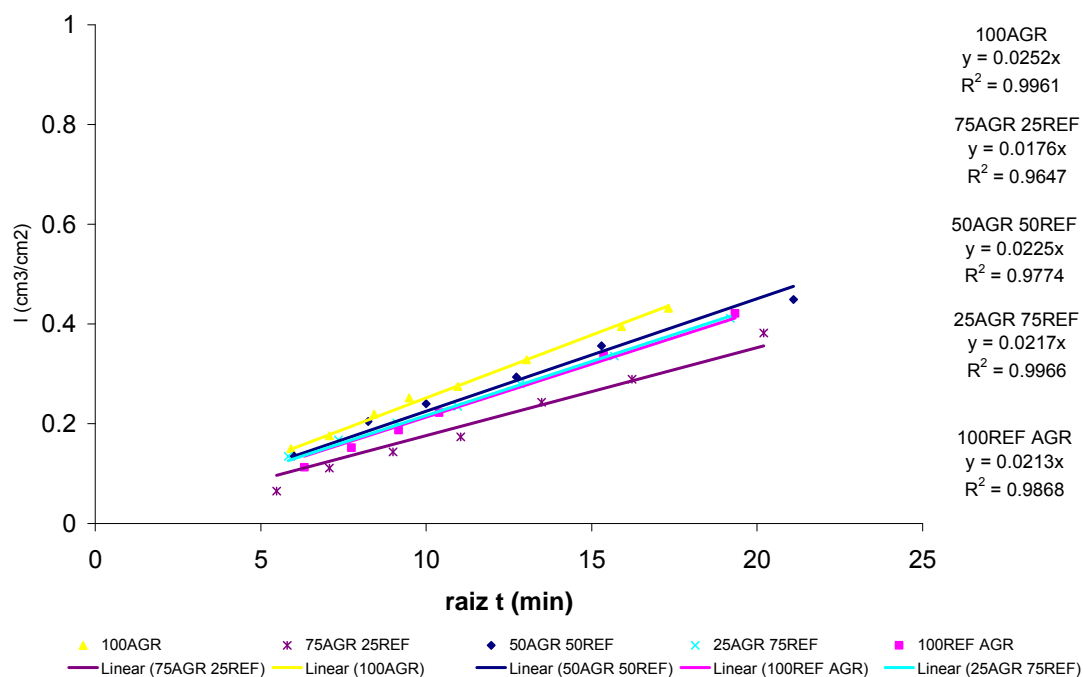
**Figura 76: Sorptividades das argamassas x Teor de Substituição.**

As figuras 77, 78 e 79 apresentam os gráficos, dos quais são extraídos os coeficientes de sorptividades das argamassas estudadas.

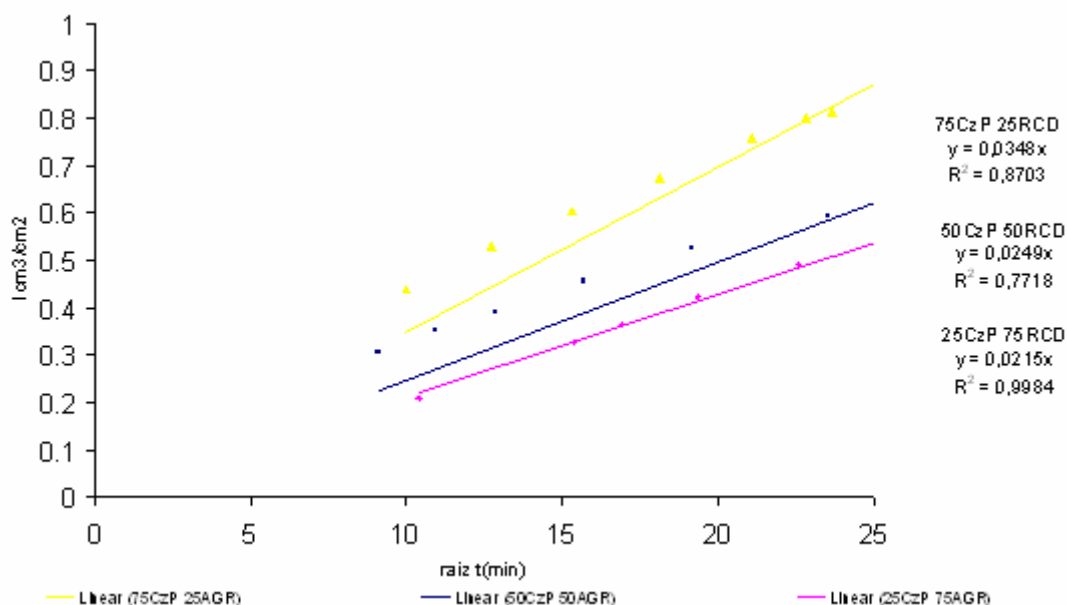




**Figura 77: Volume de líquido absorvido por área da seção transversal em função da raiz do tempo de argamassas com CzP-SF– Determinação da sorptividade.**

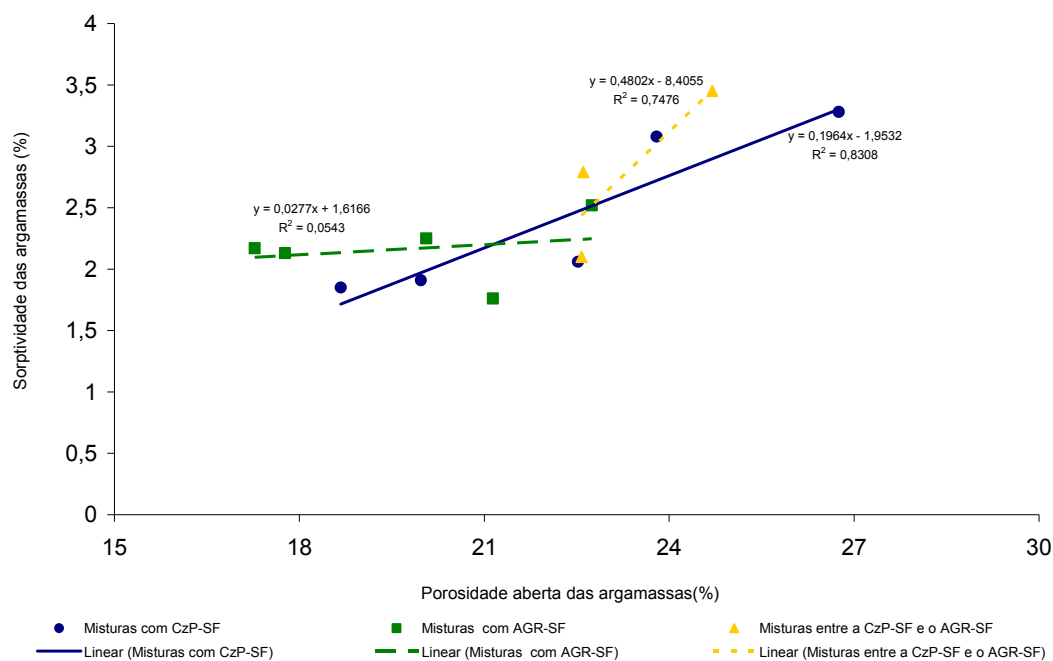


**Figura 78: Volume de líquido absorvido por área da seção transversal em função da raiz do tempo de argamassas com AGR-SF– Determinação da sorptividade.**



**Figura 79: Volume de líquido absorvido por área da seção transversal em função da raiz do tempo de argamassas com CzP-SF e AGR-SF– Determinação da sorptividade.**

A figura 80 apresenta uma tendência linear crescente das sorptividades com o aumento da porosidade nas misturas com CzP-SF. No entanto, esta relação não pôde ser verificada para as argamassas com AGR-SF.



**Figura 80: Sorptividade das argamassas x Porosidade das argamassas.**

- **Sorptividades- Análises e Considerações.**

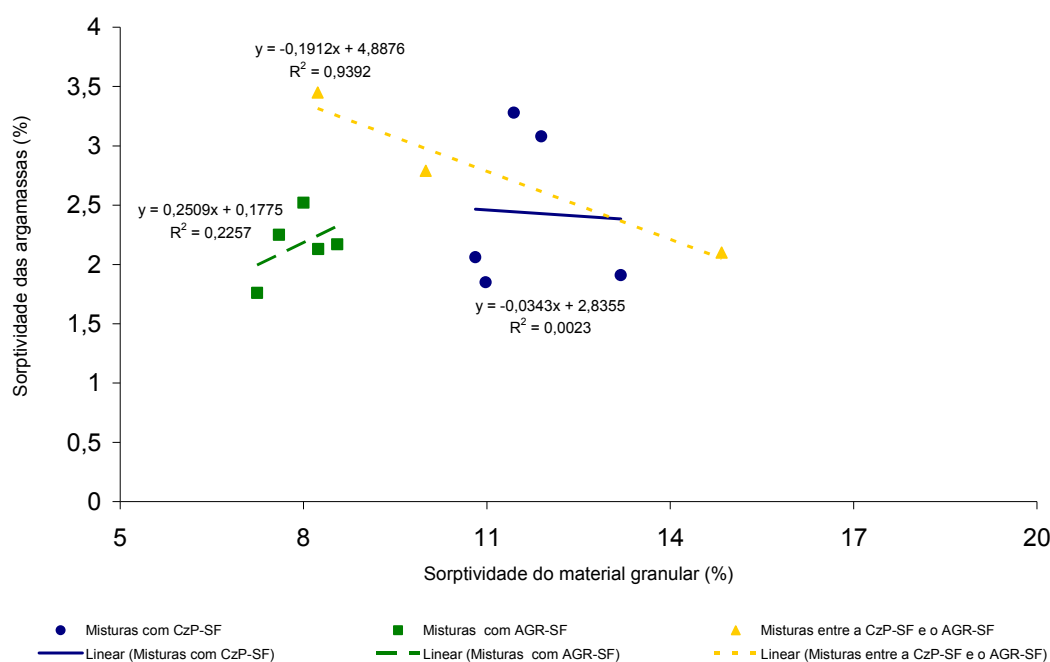
Os coeficientes de sorptividade das misturas com CzP-SF, mostraram-se, em média, maiores que os coeficientes das misturas com AGR-SF.

Observou-se que a mistura com 75% de CzP-SF e 25% de AGR-SF apresenta coeficiente de sorptividade maior que a argamassa com 100% de CzP-SF, mais porosa. Acredita-se que o AGR-SF, quando misturado com a CzP-SF forma uma estrutura porosa mais propícia a poros capilares interligados, ainda que em suas misturas com a referência esse comportamento tenha sido o contrário. Esse fato é reforçado pelo grau de saturação da mistura granular com 75% de CzP-SF e 25% de AGR-SF ser maior do que o da mistura com 100% de CzP. O teor volumétrico da mistura granular com 75CzP-25AGR-SF também é maior quando comparado à mistura 100CzP-SF.

Acredita-se que a tortuosidade dos poros formados nas argamassas com AGR-SF influencia fortemente a sorptividade das argamassas de agregado reciclado, por isso a relação entre esse parâmetro e a porosidade das misturas não pôde ser verificada.

- **Relação com propriedades hidrodinâmicas do material granular**

A figura 81 mostra a relação entre as sorptividades das misturas granulares e das argamassas. Para relacionar os dois parâmetros, a parte retilínea da curva de onde o parâmetro sorptividade foi tirado, foi considerada passando pela origem do gráfico. Para os materiais granulares, foi considerada a sorptividade do estado solto.



**Figura 81: Sorptividade das argamassas x Sorptividade das misturas granulares.**

Não foi encontrada relação entre as sorptividades das misturas granulares e das argamassas.

#### 4.6.2 Ângulo de molhamento aparente

O ângulo de molhamento aparente das argamassas foi determinado através da relação entre a inclinação das retas referentes à sorptividade da água e do álcool de cada argamassa. A figura 82, que corresponde aos valores da argamassa com 100% CzP-SF, exemplifica o gráfico em questão.

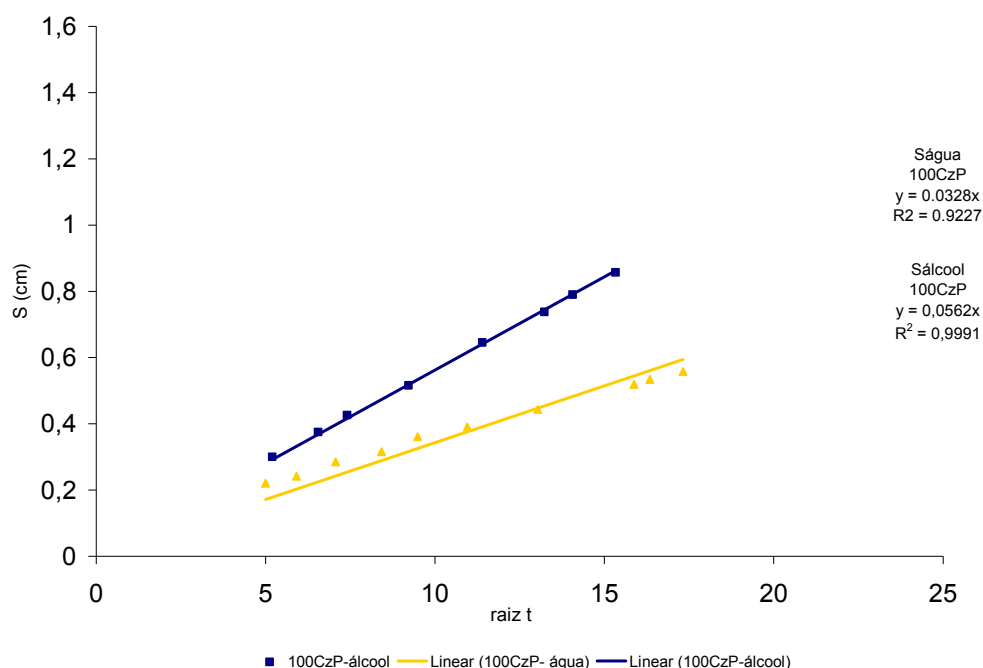


Figura 82: Estoque de líquido infiltrado x raiz do tempo.

Na tabela 15 estão apresentados os dados referentes ao cálculo do ângulo de molhamento aparente.

Tabela 15: Estoques de líquido infiltrado e ângulo de molhamento aparente.

Argamassa	Sa (cm x min <sup>1/2</sup> )	Sal (cm x min <sup>1/2</sup> )	Ângulo de molhamento (°)
<b>100CzP</b>	0,0328	0,0563	42,41746505
<b>75CzP 25REF</b>	0,0308	0,0411	40,71684377
<b>50CzP 50REF</b>	0,0206	0,0324	41,9224366
<b>25CzP 75REF</b>	0,0191	0,0317	42,23720571
<b>100REF CzP</b>	0,0185	0,0273	41,50195962
<b>100AGR</b>	0,0252	0,0283	38,92970357
<b>75AGR 25REF</b>	0,0176	0,0165	36,21770042
<b>50AGR 50REF</b>	0,0225	0,0261	39,31586676
<b>25AGR 75REF</b>	0,0217	0,0326	41,62544897
<b>100REF AGR</b>	0,0213	0,0127	20,87397784
<b>75AGR 25CzP</b>	0,0215	0,0369	42,41690874
<b>50AGR 50CzP</b>	0,0249	0,0449	42,66053931
<b>25AGR 75CzP</b>	0,0348	0,0459	40,61512595

A figura 83 apresenta o ângulo de molhamento aparente em função do teor de substituição. Não foi encontrada uma relação nítida entre a propriedade medida e o teor de substituição das argamassas.

As maiores variações no ângulo de molhamento aparente foram encontradas nas argamassas com AGR-SF. As misturas com CzP-SF apresentaram ângulos de molhamento ligeiramente maiores, logo, apresentam menor molhabilidade.

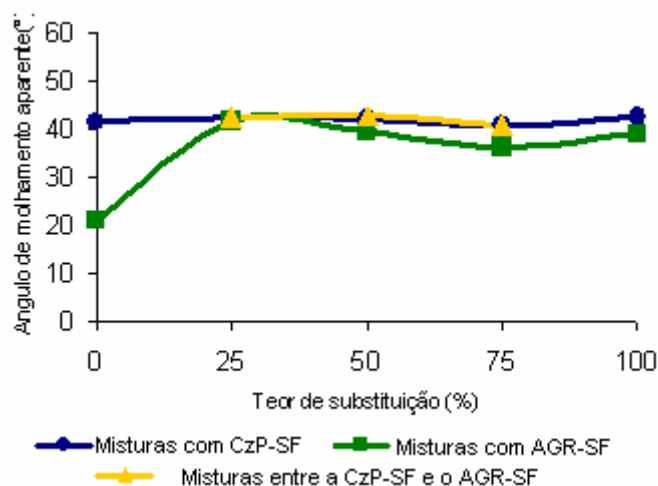


Figura 83: Ângulo de molhamento aparente x teor de substituição (%)

## 4.7 Propriedades elétricas das argamassas no estado endurecido

Primeiro, os teores de umidades das amostras de cada mistura, utilizadas para montagem da curva de calibração, são apresentados. Em seguida, as curvas de calibração com os resultados das resistências elétricas das argamassas em diferentes teores de umidade e os perfis de resistência elétrica e de umidade são apresentados e analisados.

### 4.7.1 Resistências elétricas – Resultados.

As sondas usadas para montagem da curva de calibração apresentaram os teores de umidade volumétricos mostrados na tabela 16. Foram usadas até 10 sondas para cada mistura. Na mistura 25CzP 75AGR, a sonda 1 com 0% de umidade, foi usada uma segunda vez. A umidade colocada na sonda 1 corresponde ao valor identificado na tabela como sonda 11.

Tabela 16: Umidade das sondas.

Argamassas	Umidades										
	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5	Sonda 6	Sonda 7	Sonda 8	Sonda 9	Sonda 10	Sonda 11
<b>100REF CzP</b>	0,22	3,07	5,11	5,58	8,52	9,08	11,3	15,8	19,08		
<b>75REF 25CzP</b>	0,27	3,71	6,31	9,09	9,9	11,93	18,78	7,83	11,86	15,64	
<b>50REF 50CzP</b>	0,25	2,5	5,08	7,4	7,8	11,85	12,75	15,03	19,14	21,43	
<b>25REF 75CzP</b>	0,18	2,58	6,07	7,61	8,57	13,27	21,37	24,49	29,46		
<b>100CzP</b>	0	4,97	9,26	14,45	17,30						
<b>100REF AGR</b>	0	2,35	3,61	8,35	8,76	11,98	17,78	18,76	26,56		
<b>75REF 25AGR</b>	0	2,2	4,16	9,72	11,92	16,9	18,35	19,96			
<b>50REF 50AGR</b>	0	1,36	2,34	4,7	6,7	8,26	8,83	12,54	13,8	20,68	
<b>25REF 75AGR</b>	0,15	2,74	4,24	5,94	11,16	14,31	15,04	16,69	17,84		
<b>100AGR</b>	0	1,95	5,37	7,06	11,11	13,56	16,45	18,41	20,74	30,24	
<b>25CzP 75AGR</b>	0	2,19	4,94	6,35	11,15	16,30	17,12	17,15	21,52	22,40	27,40
<b>50CzP 50AGR</b>	0	4,66	7,10	8,95	10,14	14,62	21,28				
<b>75CzP 25AGR</b>	0	4,86	7,99	11,97	13,61	19,87					

As resistências elétricas das argamassas secas foram relacionadas com o teor de substituição dos agregados. Através da figura 84, nota-se que a resistência das argamassas aumenta com o aumento do teor de CzP-SF e AGR-SF.

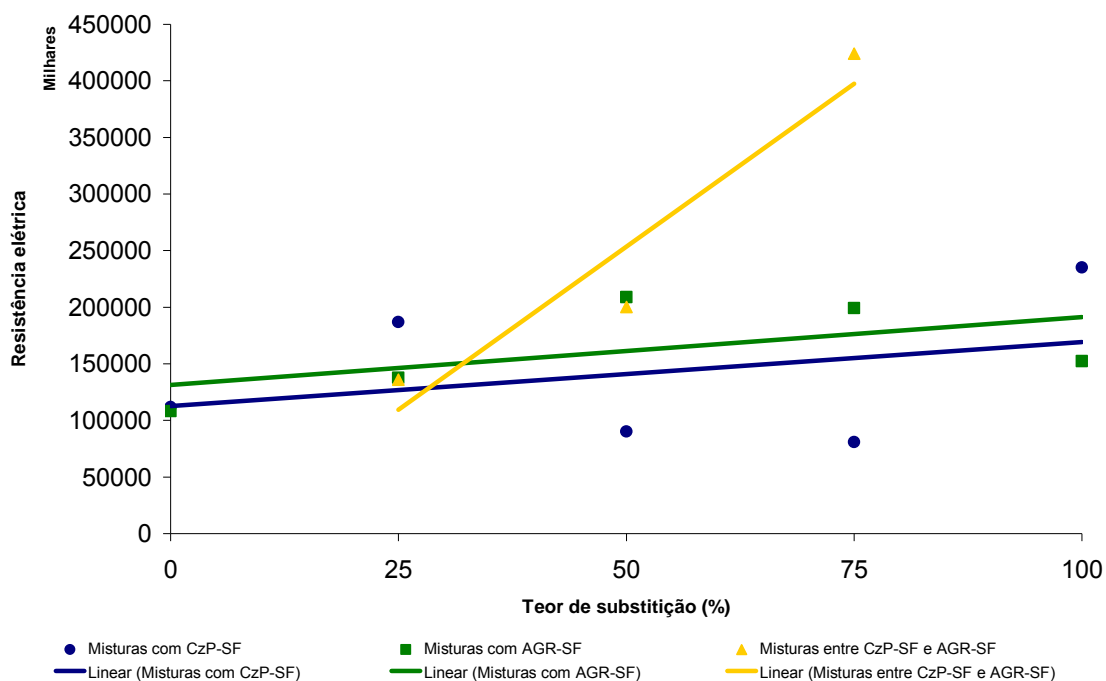


Figura 84: Resistência elétrica x teor de substituição

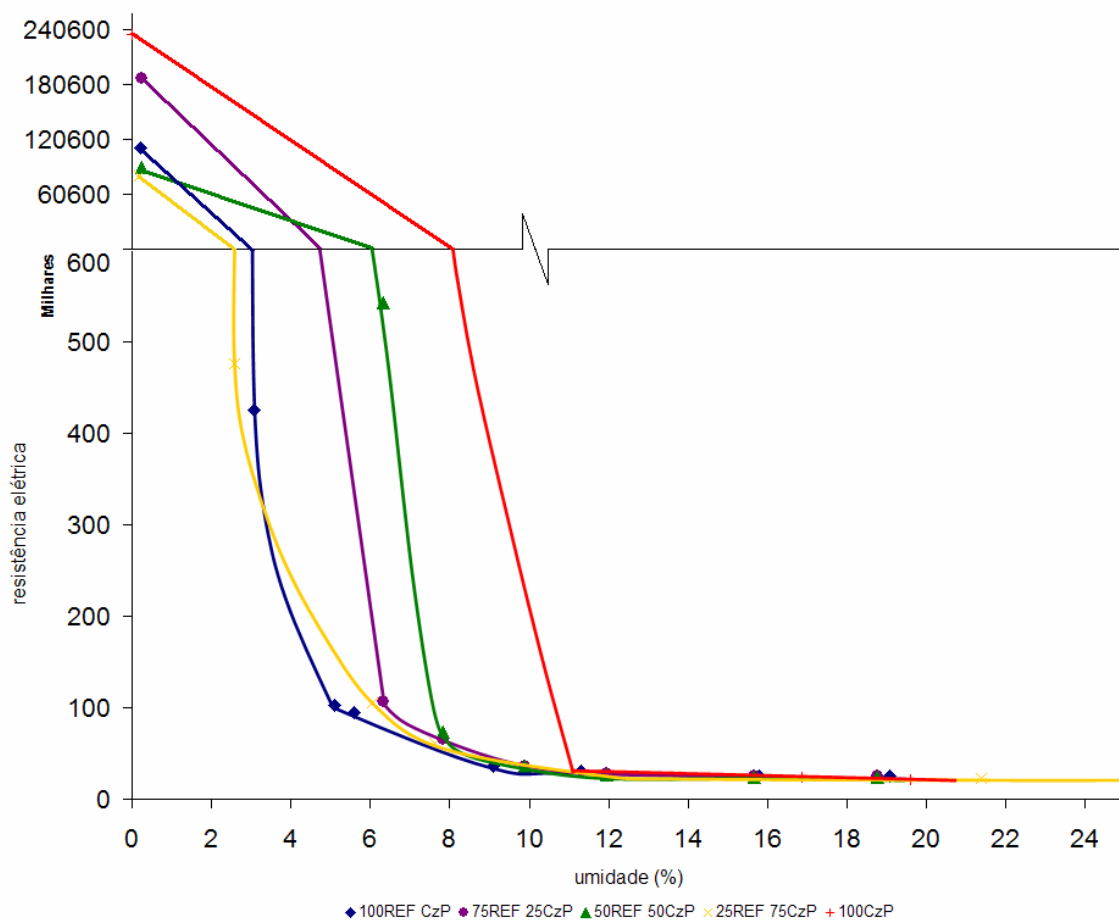
- **Resistências elétricas – Análises e Considerações.**

Credita-se esse aumento nas resistências ao aumento do teor de CzP-SF e AGR-SF, que induzem a um meio menos alcalino na solução dos poros, registrado pelas sondas.

- **Curvas de calibração das misturas - Resultados**

As figuras 85, 86 e 87 apresentam as curvas de calibração, que relacionam a resistência com o teor de umidade volumétrico, das misturas com CzP-SF, AGR-SF e entre a CzP-SF e o AGR-SF. Os gráficos, nas figuras, mostram que a relação entre esses dois parâmetros não é linear e que quanto maior o teor de umidade, menor a resistência elétrica.

O gráfico de cada mistura se divide em três zonas: a primeira, retilínea, onde a saturação da amostra é muito pequena e a resistência pouco varia, a segunda, no formato de curva, onde há maior variação de umidade e resistência e a terceira, retilínea, onde a resistência pouco varia e a amostra está praticamente saturada.



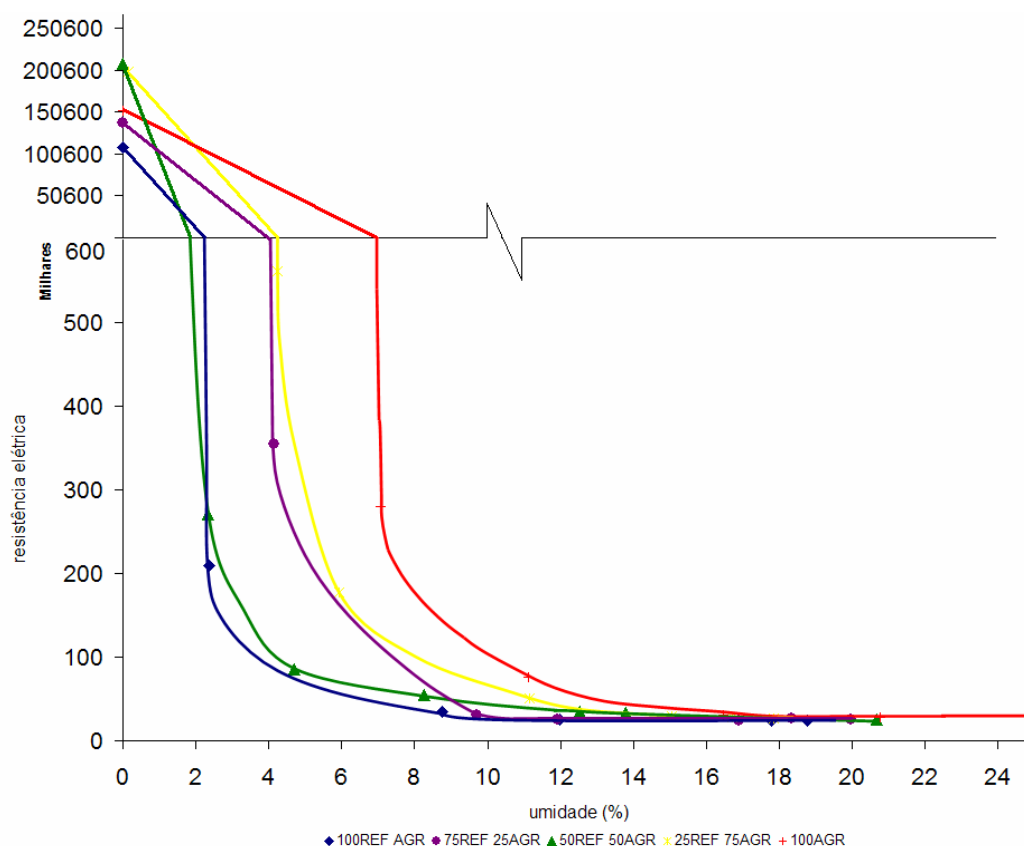
**Figura 85: Resistência elétrica x teor de umidade – Misturas com CzP-SF.**

A tabela 17 mostra o grau de saturação das argamassas com CzP-SF a três teores de umidade definidos no gráfico:

**Tabela 17: Saturação das argamassas aos teores de umidade definidos – Misturas com CzP-SF**

Mistura	Saturação máxima (%)	Teor de umidade (%)	Grau de saturação (%)	Teor de umidade (%)	Grau de saturação (%)	Teor de umidade (%)	Grau de saturação (%)
<b>100REF CzP</b>	18.67235808	3.2	0.1713763	6.7	0.358819168	10	0.535550998
<b>25CzP 75REF</b>	19.97308389	5.3	0.2653571	7.7	0.385518833	11	0.550741191
<b>50CzP 50REF</b>	22.52035301	6.5	0.2886278	9.7	0.43072149	11.9	0.5284109
<b>75CzP 25REF</b>	23.79708852	2.8	0.1176615	7.8	0.327771189	11.8	0.495858978
<b>100CzP</b>	26.74962909	8.5	0.3177614	10.3	0.385052068	11.7	0.437389242

Na figura 86 abaixo, estão as curvas de calibração das misturas com AGR-SF:



**Figura 86: Resistência elétrica x teor de umidade – Misturas com AGR-SF.**

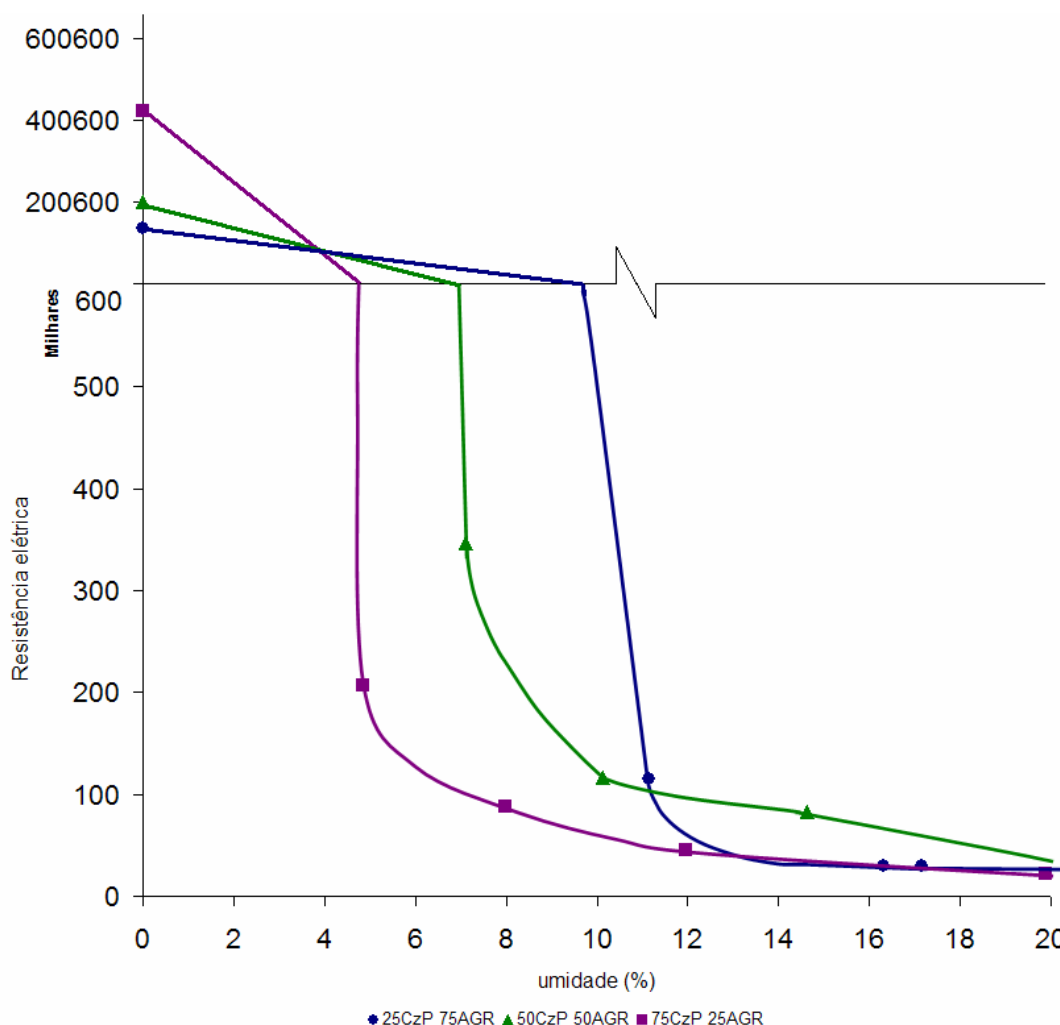
A tabela 18 mostra o grau de saturação das argamassas com AGR-SF a três teores e umidade definidos no gráfico:

**Tabela 18: Saturação das argamassas aos teores de umidade definidos- misturas com AGR-SF**

Mistura	Saturação máxima (%)	Teor de umidade (%)	Grau de saturação (%)	Teor de umidade (%)	Grau de saturação (%)	Teor de umidade (%)	Grau de saturação (%)
<b>100REF AGR</b>	17.76644654	2.3	0.1294575	5.9	0.332086666	9.5	0.534715818
<b>25AGR 75REF</b>	17.27776653	4	0.2315114	6.2	0.358842677	10.1	0.584566297
<b>50AGR 50REF</b>	20.05961633	2.1	0.1046879	4.8	0.23928673	11.8	0.588246545
<b>75AGR 25REF</b>	21.13956323	4.4	0.2081405	6.7	0.316941269	13	0.614960671
<b>100AGR</b>	22.74508446	7.2	0.3165519	10	0.439655435	17.7	0.77819012



Na figura 87 abaixo, estão as curvas de calibração das misturas entre CzP-SF e AGR-SF:



**Figura 87: Resistência elétrica x teor de umidade – misturas entre CzP-SF e AGR-SF.**

A tabela 19 mostra o grau de saturação das argamassas CzP-AGR a três teores e umidade definidos no gráfico:

**Tabela 19: Saturação das argamassas aos teores de umidade definidos- misturas entre CzP-SF e AGR-SF**

Mistura	Saturação máxima (%)	Teor de umidade (%)	Grau de saturação (%)	Teor de umidade (%)	Grau de saturação (%)	Teor de umidade (%)	Grau de saturação (%)
<b>25AGR 75CzP</b>	24.69751067	4.4	0.1781556	8	0.323919285	17	0.688328481
<b>50AGR 50CzP</b>	22.60450327	6.9	0.3052489	10.2	0.45123752	16	0.707823561
<b>75AGR 25CzP</b>	22.57993398	9.8	0.4340137	12.8	0.566874997	14.9	0.659877926

Observou-se que, quanto maior o teor de CzP-SF e AGR-SF, maior o teor de umidade volumétrico nas amostras para que elas passem da primeira para a segunda fase

de comportamento do gráfico e que essa mudança acontece com as argamassas, com grau de saturação entre 0.2 e 0.3, em média.

Nas misturas com CzP-SF a mudança da segunda para terceira fase ocorre com as argamassas com graus de saturação maiores que 0.5, em média. Nas misturas com AGR-SF, essa mudança aconteceu com as argamassas com graus de saturação maiores que 0.6 e nas misturas entre a CzP-SF e o AGR-SF, com grau de saturação maior que 0.65.

- **Curvas de calibração das misturas – Análises e Considerações.**

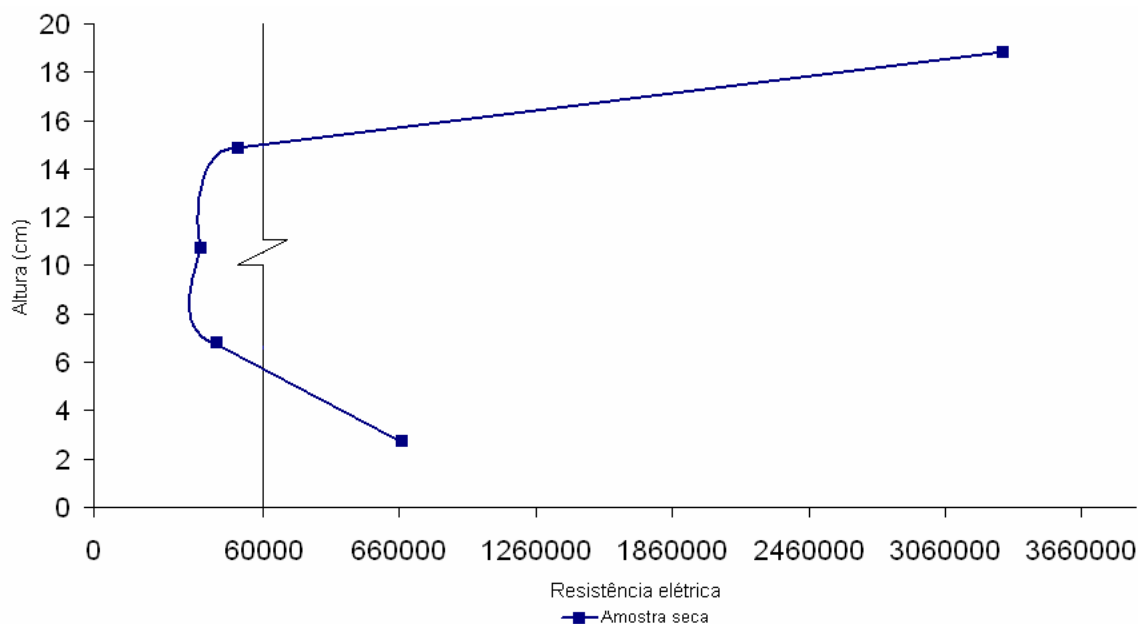
Entendeu-se que para graus de saturação muito baixos ou muito altos, há uma alteração muito grande e muito pequena da resistência, respectivamente, com a alteração da umidade, portanto, nesses casos, a precisão do método de medição precisa ser verificada.

#### **4.7.2 Perfis de resistência elétrica das argamassas**

- **Perfis de resistência das argamassas no estado seco- Resultados.**

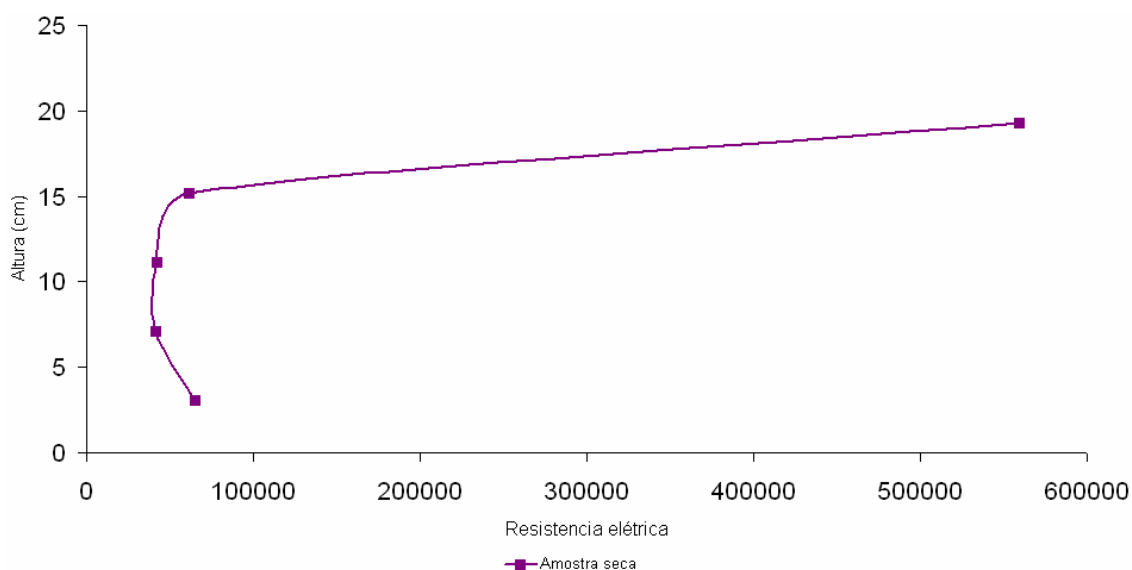
Era esperado que todos os pontos de medida (hastes a quatro, sete, onze, quinze e dezenove centímetros) na amostra respondessem, no estado seco, com uma mesma resistência inicial, para uma mesma mistura. Entretanto este comportamento não foi verificado. As argamassas apresentaram resistências elétricas maiores nas extremidades, sendo que na extremidade superior, esses valores foram mais elevados. As figuras 88 e 89 mostram os dois tipos de perfis encontrados nas misturas. A figura 88 corresponde à argamassa 50CzP e a figura 89 à argamassa 100AGR.

Na figura 88, o gráfico está apresentado em duas escalas, separadas por uma linha de interrupção, para melhorar a visualização do perfil de resistência.



**Figura 88: Perfil de resistência na condição seca. 50CzP-SF**

No gráfico, os pontos intermediários de medição apresentaram valores de resistência bem próximos à saturação, como pode ser revisto na curva de calibração das misturas com CzP-SF. O primeiro ponto registrou um valor um pouco mais alto e o ultimo ponto de medição, uma resistência bem mais elevada.

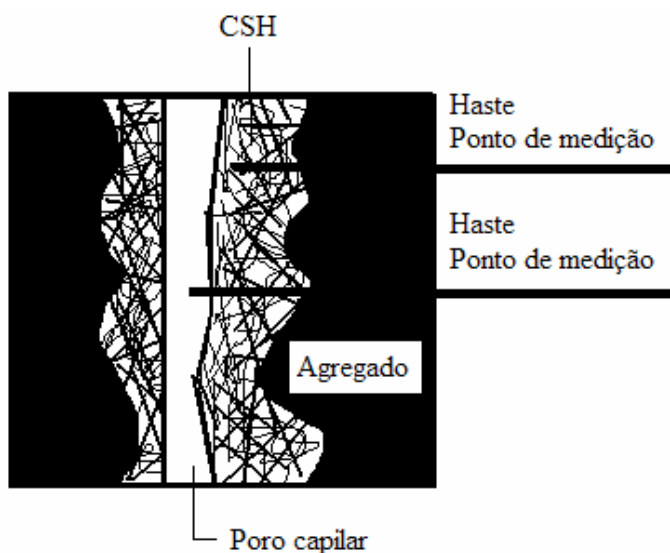


**Figura 89: Perfil de resistência na condição seca. 100AGR-SF.**

No gráfico da figura 89, os pontos intermediários de medição apresentaram valores de resistência também próximos à saturação. A resistência registrada no primeiro ponto também foi maior e a do ultimo ponto de medição, bem mais elevada.

- **Perfis de resistência das argamassas no estado seco - Análises e Considerações.**

Considerou-se três explicações complementares para os resultados obtidos. Pode existir uma umidade residual nas amostras. Esta umidade teria permanecido em função das amostras serem secas a apenas 50°C, para evitar alterações na sua estrutura porosa. Ainda, a água estrutural (quimicamente combinada) e a presença de sais podem ter afetado as medidas de resistência. Considerando a estrutura da argamassa na figura 90 abaixo, se um eletrodo estiver inserido no poro capilar, e outro entre os géis de CSH, as leituras de resistência do eletrodo nos géis de CSH será menor.



**Figura 90: Estrutura da argamassa.**

Uma terceira explicação é a de que, pela particularidade das amostras, elas não puderam ser desmoldadas. Esse fato dificultou a saída de umidade, que se deu somente no sentido ascendente da direção em que elas foram acondicionadas. Dessa forma, a umidade presente na base permaneceu por mais tempo no interior da amostra, hidratando o cimento, o que gerou zonas com graus de hidratações diferentes na base e no topo. O topo das amostras hidratou menos, formou menos géis, e portanto, apresentou maiores resistências.

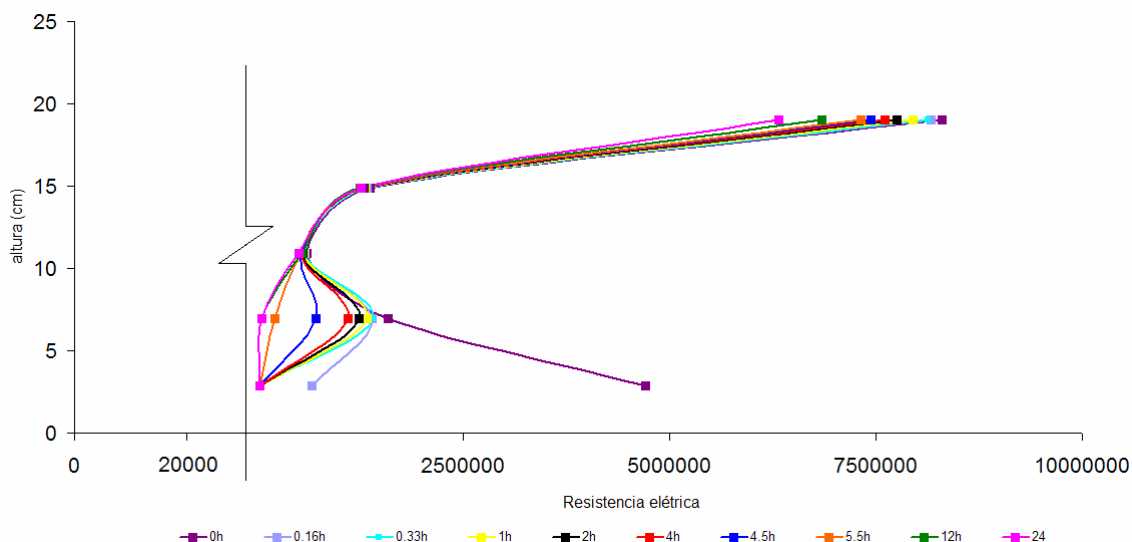
- **Perfis de resistência das argamassas ao longo da absorção capilar - Resultados.**

Também era esperado que com o avanço da umidade no meio poroso das argamassas, a resistência elétrica diminuísse. Entretanto, em alguns pontos, observou-se um comportamento contrário.

As figuras 91- 97 apresentam alguns perfis de resistência elétrica das argamassas estudadas. Os gráficos mostram a variação da resistência das amostras quando absorvem

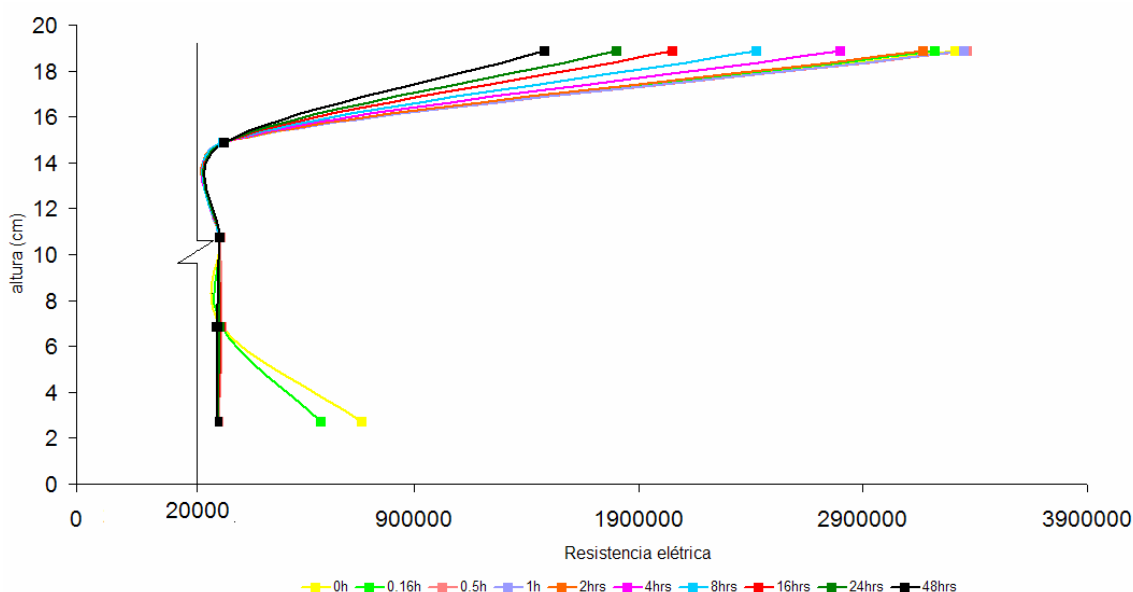
água por capilaridade, ao longo do tempo, em função da altura de medição e são apresentados em duas escalas, limitadas pela linha de corte, para melhor visualização.

A figura 91 mostra o perfil de resistência da mistura com 100% de CzP-SF, onde observou-se a redução da resistência, nas hastes, ao longo do tempo.



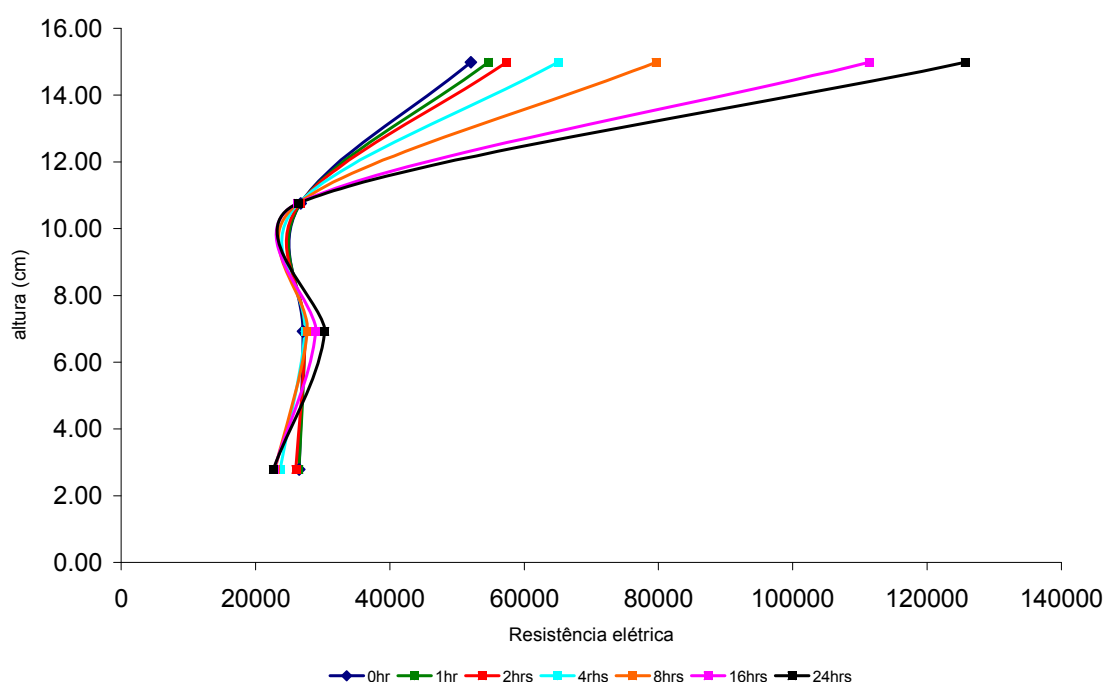
**Figura 91: Perfil de resistência elétrica- 100CzP-SF**

A figura 92 mostra o perfil da mistura com 50% de CzP-SF. Observou-se que a primeira, segunda, terceira e quinta haste apresentaram resistências menores ao longo do tempo. Mas para a quarta haste, os valores aumentaram. Entretanto, na quarta haste, a variação do teor de umidade foi inferior a 0,5%, registrando de 8,09% a 8,25% de umidade, ou seja um grau de saturação inferior a 0,4.



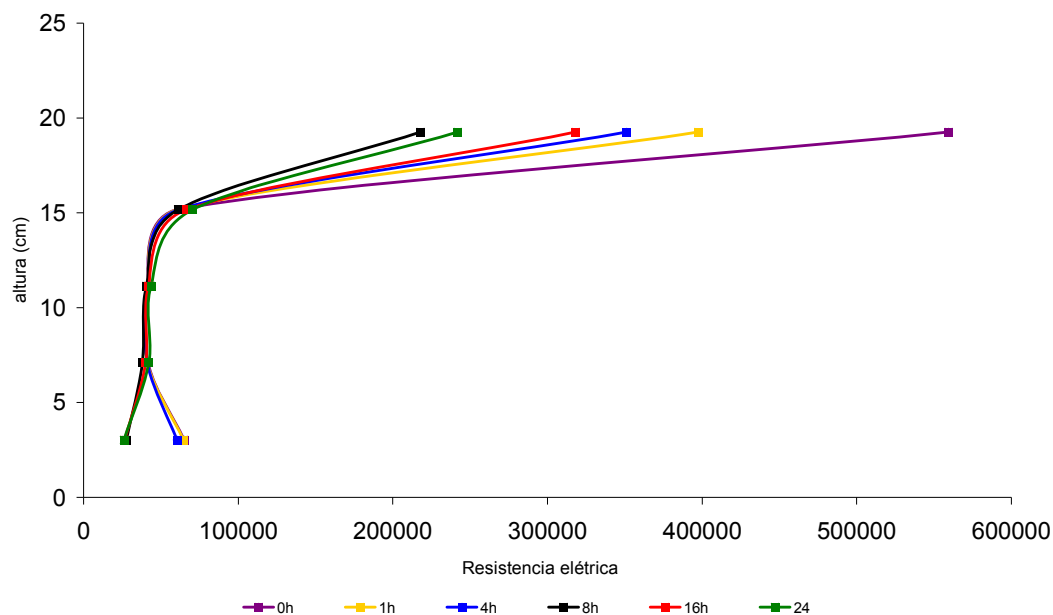
**Figura 92: Perfil de resistência da mistura com 50% de CzP-SF**

O perfil da mistura referência da CzP-SF é mostrado na figura 93. Neste perfil, a primeira haste e a última apresentaram resistências menores com o tempo. As resistências medidas nas hastes onde houve aumento da resistência corresponderam a uma variação máxima do teor umidade volumétrico de 5,3%. Nas hastes 2 e 3, os teores de umidade volumétricos registrados foram de aproximadamente 15%, que corresponde a um grau de saturação de 0.8. Na quarta haste a variação foi de 3,5%, correspondente a um grau de saturação de 0,4. Para melhor visualização do gráfico, a quinta haste não foi plotada.



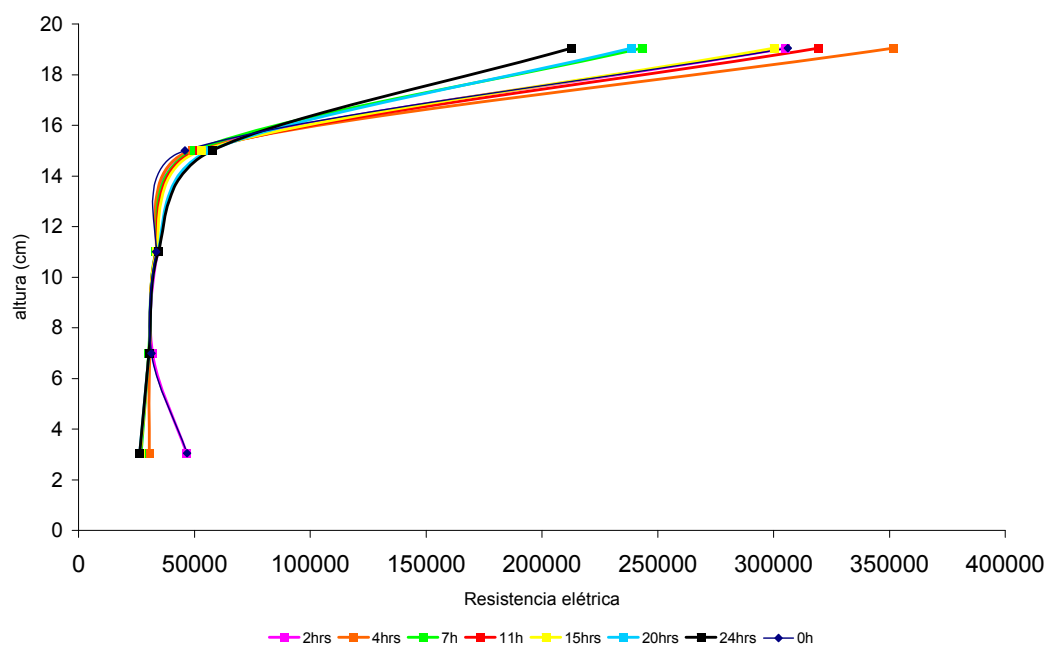
**Figura 93: Perfil de resistência da mistura 100ref CzP-SF**

A figura 94 mostra o perfil da mistura com 100% de AGR-SF. Observou-se que a primeira, segunda e a quinta haste apresentaram resistências menores ao longo do tempo. Mas para a terceira e a quarta haste, os valores aumentaram. Entretanto, esse aumento na resistência significou uma variação do teor de umidade inferior a 2%, com grau de saturação entre 0.4 e 0.6.



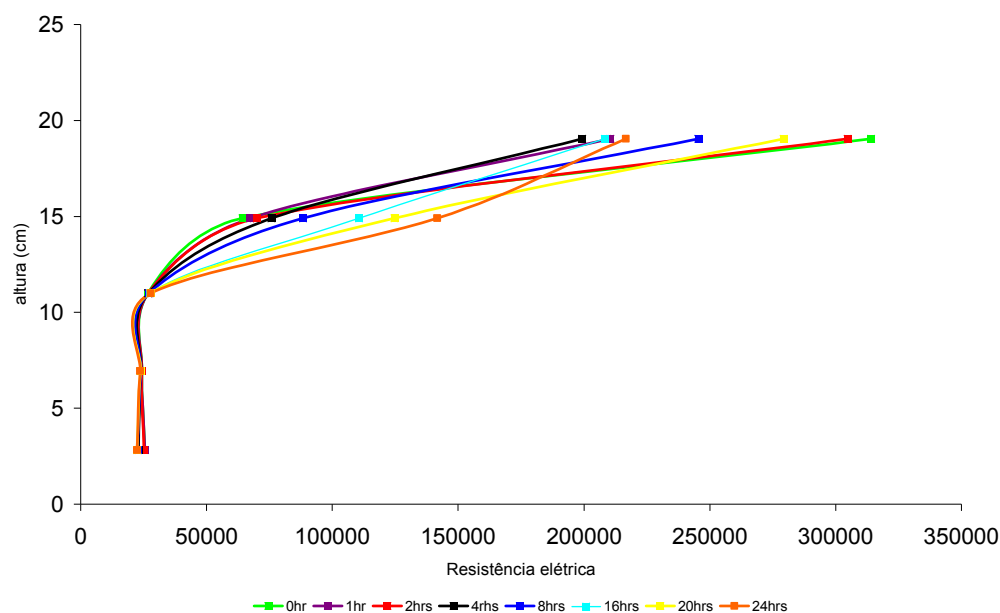
**Figura 94: Perfil de resistência da mistura com 100% AGR-SF**

A figura 95 mostra o perfil da mistura com 50% de AGR-SF. Neste perfil a primeira, segunda e a quinta haste também apresentaram resistências menores ao longo do tempo. Para a terceira e a quarta haste, os valores aumentaram. A variação de umidade volumétrica foi 5%, com umidade calculada máxima próxima de 14% e grau de saturação 0.7.



**Figura 95: Perfil de resistência da mistura com 50% de AGR-SF**

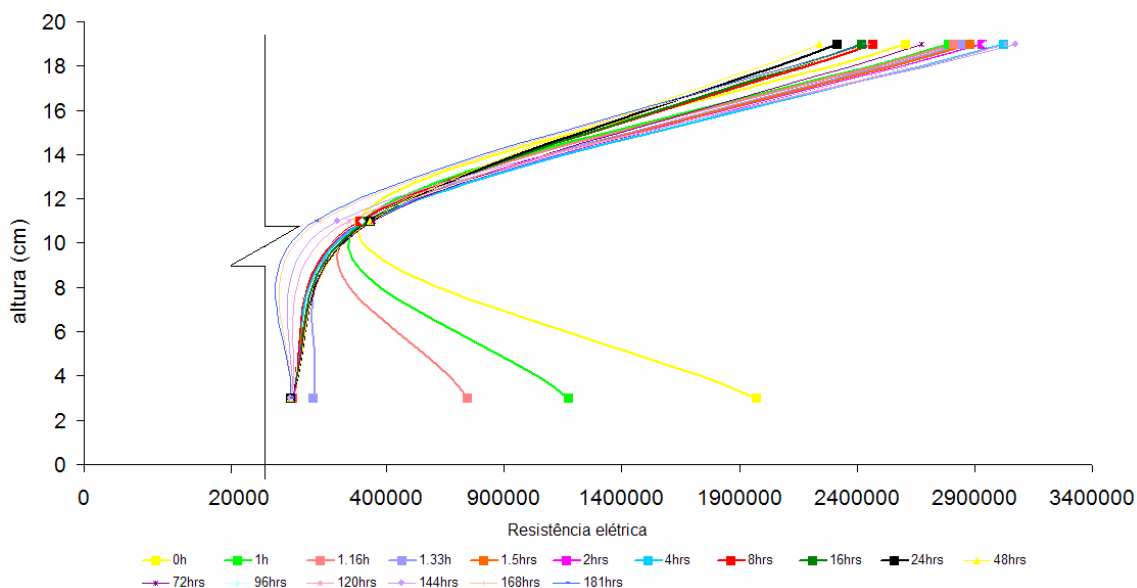
A figura 96 mostra o perfil da mistura referência do AGR-SF. Novamente, a primeira, segunda e quinta haste apresentaram resistências menores ao longo do tempo. Para a terceira e a quarta haste, os valores aumentaram, com variação de umidade máxima registrada de 3,7% e umidade máxima registrada nesses pontos de 11%, que corresponde a um grau de saturação próximo a 0.6.



**Figura 96: Perfil de resistência da mistura Referência do AGR-SF**

A figura 97 mostra o perfil da mistura com 50% de CzP-SF e 50% de AGR-SF, que foi plotado sem os resultados das hastes dois e quatro, que apresentaram deficiências durante o ensaio. As hastes apresentam resistências menores ao longo do tempo.





**Figura 97: Perfil de resistência da mistura com 50% de CzP-SF e 50% de AGR-SF**

- **Perfis de resistência das argamassas ao longo da absorção capilar – Análises e Considerações.**

Nas misturas, as hastes que registraram valores de resistência maiores com o tempo, apresentaram variação de umidade pequena ou graus de saturação muito baixos ou próximos da saturação.

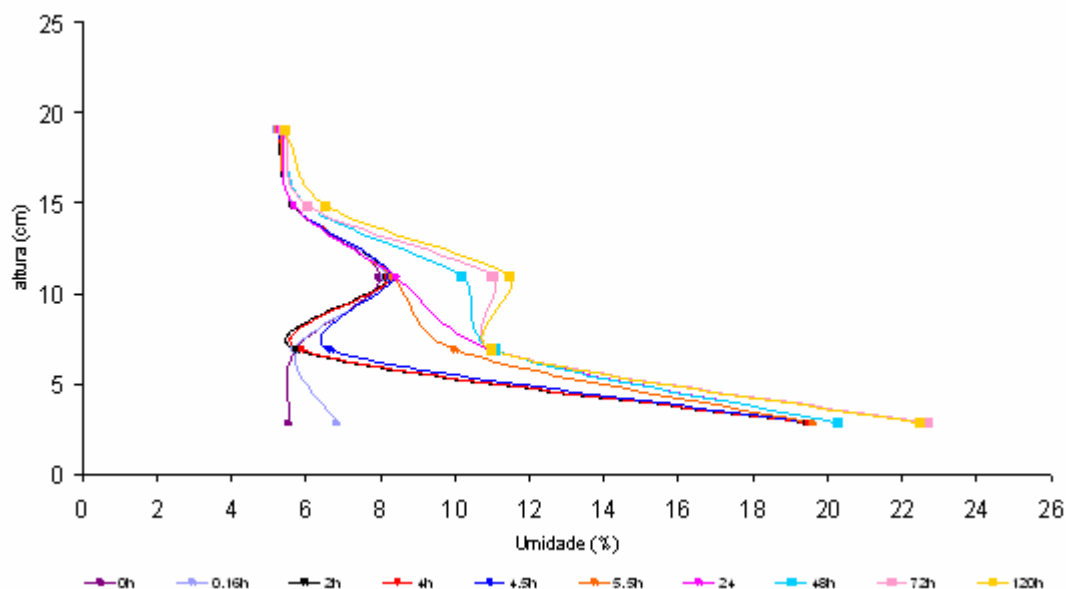
Considerou-se, através do observado nas curvas de calibração, que, para graus de saturação muito pequenos, ou muito altos, a precisão do aparelho utilizado para medir as resistências não é muito alta, o que explicaria o registro do aumento de resistência nesses casos.

Foi considerada, também, a hipótese de que a última haste, mais próxima do topo pode ter perdido umidade residual, presente na amostra. Por isso, os valores de resistência lidos, em algumas misturas, para esta haste, aumentaram. Este fato foi percebido nas misturas 75AGR 25REF e na mistura 25CzP 75AGR. Durante o ensaio com a primeira argamassa, foi registrada uma umidade relativa de 70% e temperatura média de 25°C. Na segunda, foi registrada uma temperatura média de 28°C.

Como os perfis de umidade foram calculados com base nos resultados de resistência, medidos nas hastes, ao longo da absorção capilar, estes também apresentaram alterações. Nos perfis de umidade, as hastes não iniciam na condição seca. Nas hastes em que há aumento de resistência com o tempo, é registrado “perda de água nos perfis de umidade”.

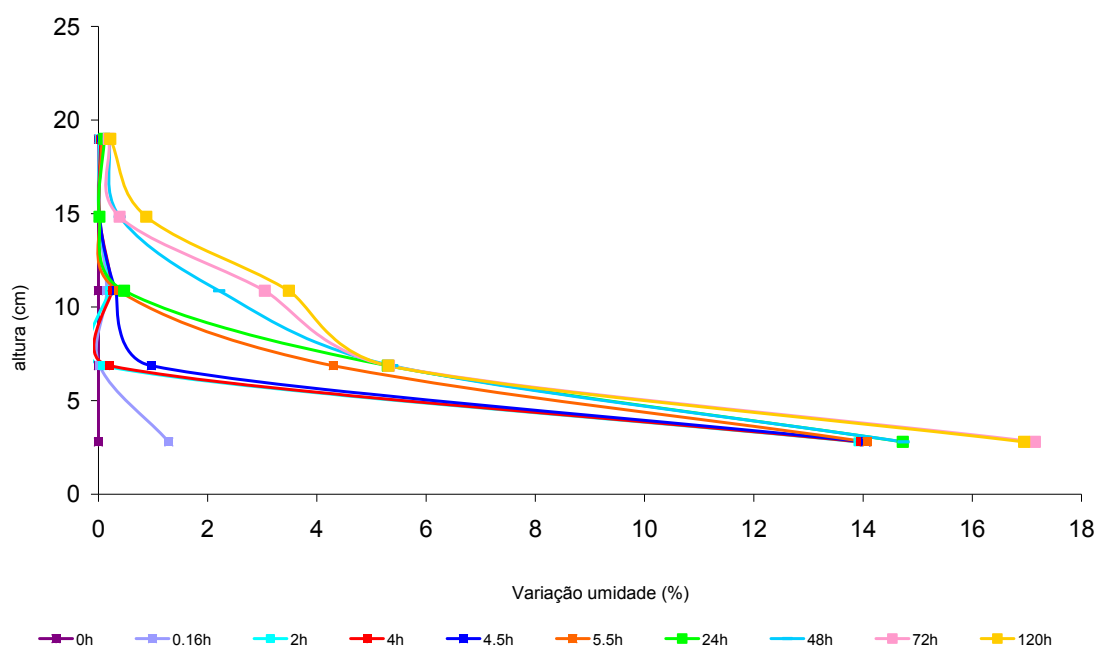
- **Perfis de umidade das argamassas ao longo da absorção capilar – Resultados.**

As figuras 98 a 100 mostram alguns perfis de umidade encontrados. Na figura 98 é mostrado o perfil da mistura com 100% de CzP-SF, onde o teor de umidade aumentou com o tempo e de modo ascendente.



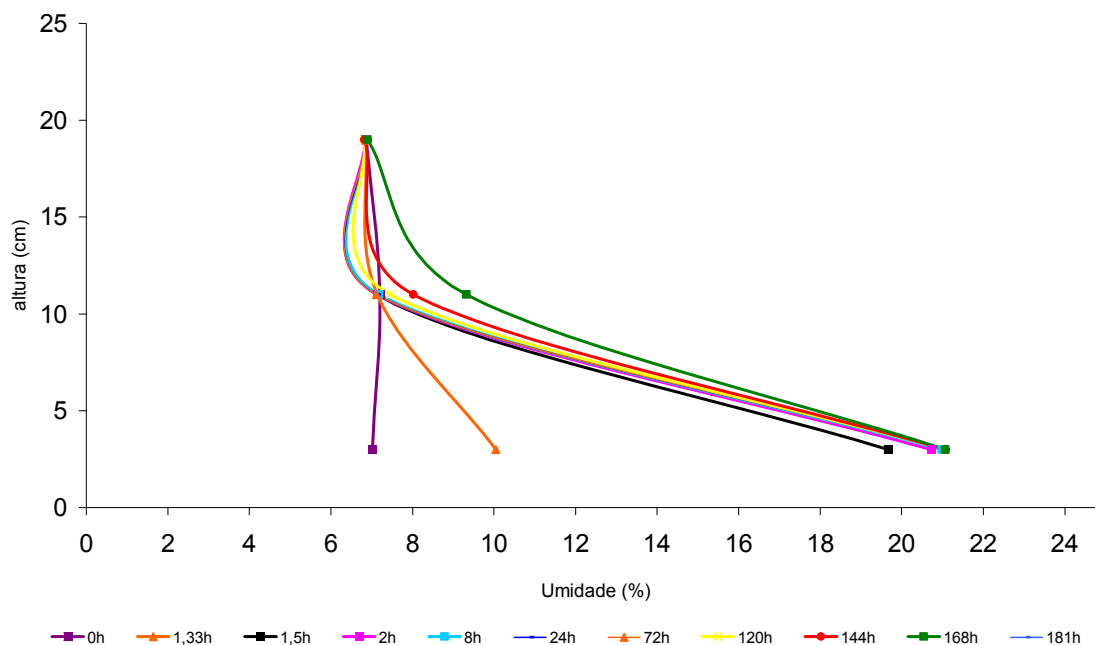
**Figura 98: Perfil de umidade da mistura com 100% CzP-SF**

Como as hastes não apresentaram o mesmo teor de umidade inicial, a figura 99 apresenta o perfil em função da variação de umidade da mistura com 100% de CzP-SF.



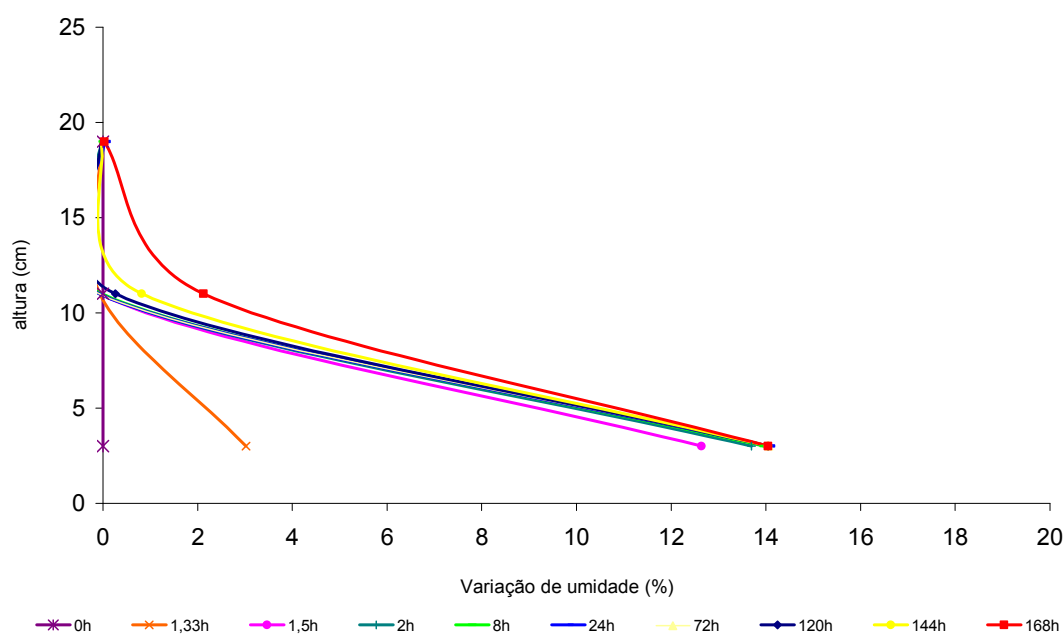
**Figura 99: Perfil da variação de umidade da mistura com 100% CzP-SF.**

A figura 100 mostra o perfil de umidade da mistura com 50% de CzP-SF e 50% de AGR-SF, onde o teor de umidade também aumentou com o tempo e de modo ascendente.



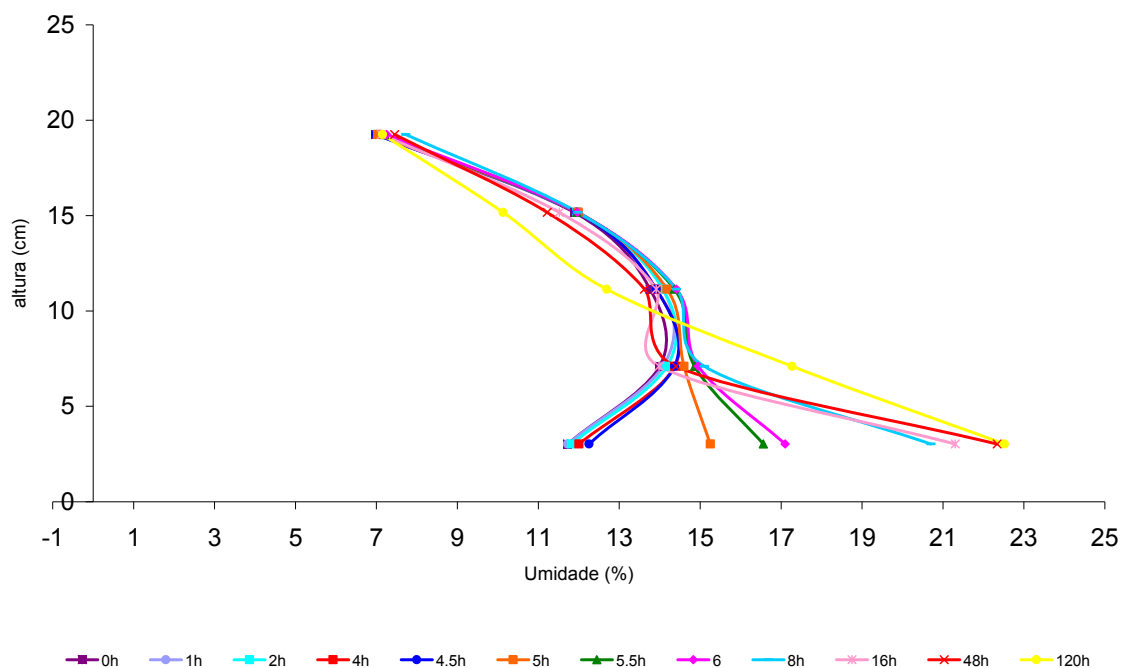
**Figura 100: Perfil de umidade da mistura com 50% de CzP-SF e 50% de AGR-SF**

A figura 101 apresenta o perfil em função da variação de umidade da mistura com 50% de CzP-SF e 50% de AGR-SF.



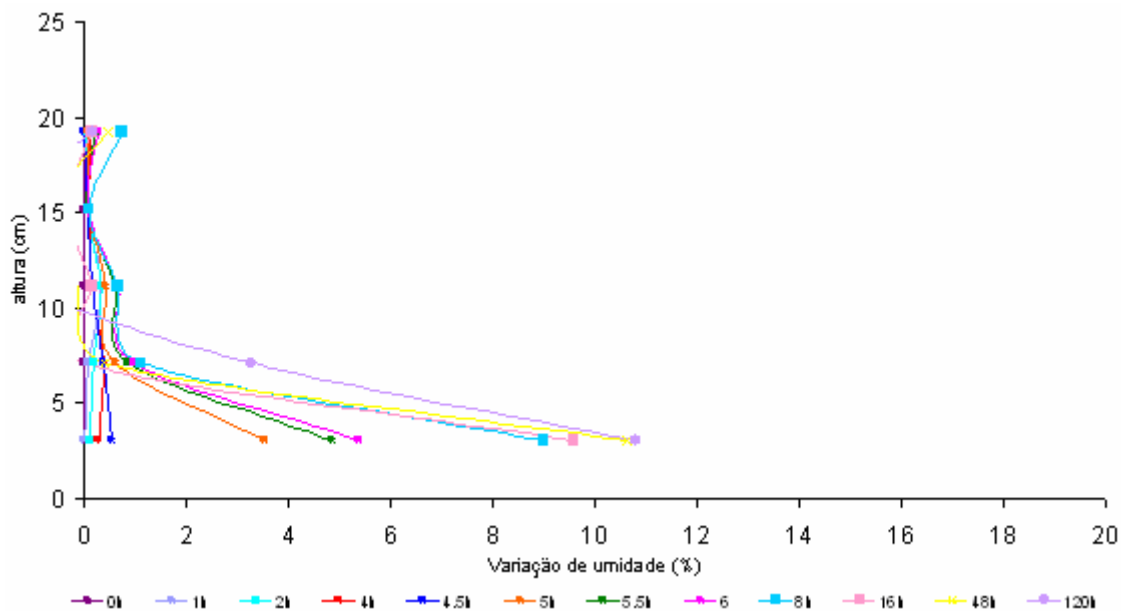
**Figura 101: Perfil da variação de umidade da mistura com 50% de CzP-SF e 50% de AGR-SF**

Por fim, apresenta-se na figura 102, o perfil de umidade da mistura com 100% de AGR-SF, onde o teor de umidade da primeira e ultima haste aumentaram com o tempo.



**Figura 102: Perfil de umidade da mistura com 100% AGR-SF**

Na figura 103 o perfil em função da variação de umidade da mistura com 50% de CzP-SF e 50% de AGR-SF é apresentado.



**Figura 103: Perfil da variação de umidade da mistura com 100% de CzP-SF.**

- **Perfis de umidade das argamassas ao longo da absorção capilar – Análises e Considerações.**

Como esperado, os perfis de umidade acompanharam os resultados encontrados nos perfis de resistência. Os gráficos de variação do perfil permitiram observar o comportamento da umidade como se esta fosse a mesma em todas as hastes, inicialmente.

## 5. CONCLUSÕES

Com esta pesquisa, algumas questões a respeito do comportamento hidrodinâmico da cinza pesada e do agregado de construção e demolição foram esclarecidas.

O grão de cinza pesada é um material mais higroscópico do que o grão do agregado de construção e demolição, em função de sua maior porosidade. Como a variação entre a porosidade da cinza pesada e a de um agregado de referência é muito maior do que a variação da porosidade desse agregado e a do agregado reciclado, as propriedades hidrodinâmicas de misturas com a cinza pesada estão mais sujeitas ao efeito do teor de substituição.

Embora a porosidade de uma mistura granular seja uma propriedade dominante no transporte de água, dentro do material poroso, a tortuosidade e a conectividade dos poros se mostraram como parâmetros que podem reduzir, de maneira positiva, essa influência.

Nas misturas granulares com AGR-SF, a hipótese de que a quantidade de água absorvida e a sorptividade das misturas granulares aumenta com o aumento do teor de AGR-SF, não foi verificada. A quantidade de água aumentou, em razão da maior porosidade dos grãos, mas as sorptividades diminuíram, em função das características dos seus poros. Para as misturas com CzP-SF, a hipótese foi aceita. A hipótese de que a substituição da areia IPT pelo AGR-SF, quando feita em volume unitário, com correção granulométrica e igualdade no tamanho dos grãos, resulta em uma composição granular com a mesma estrutura porosa da areia IPT, também não foi verificada para as misturas com AGR-SF, visto que os resultados de suas sorptividades demonstraram que a estrutura foi alterada.

A absorção de maior quantidade de água em menos tempo das misturas com maiores teores de CzP-SF, mostram que este material tem uma sucção maior que os agregados normalmente utilizados.

As propriedades hidrodinâmicas das misturas entre a CzP-SF e o AGR-SF se apresentaram entre a faixa de comportamento desses dois materiais. A mistura dos dois materiais permitiu minimizar efeitos da cinza pesada, como a absorção de água capilar e a sorptividade, melhorando o desempenho hidrodinâmico das misturas.

Quanto à influência da CzP-SF e do AGR-SF em argamassas, a hipótese de que a quantidade de água absorvida e a sorptividade das misturas granulares e das argamassas aumenta com o aumento do teor de CzP e AGR, pôde ser comprovada. A absorção de água dos grãos e a massa unitária das misturas granulares, que indicam a porosidade dos materiais, foram propriedades que influenciaram fortemente as argamassas.

Como as argamassas são fortemente influenciadas pela massa unitária dos materiais granulares, aquelas produzidas com CzP-SF também estão mais sujeitas a variações maiores em suas propriedades hidrodinâmicas com o efeito teor de substituição.

Entre os dois resíduos o AGR-SF apresentou propriedades hidrodinâmicas mais satisfatórias que a CzP-SF. A tortuosidade favoreceu o comportamento do AGR-SF, minimizando o efeito de absorção de água de seus grãos. Do ponto de vista hidrodinâmico, este apresentou melhor desempenho do que a CzP-SF.

As misturas com CzP-SF, por outro lado, se mostraram mais leves do que as misturas com AGR-SF e misturas mais leves tendem a apresentar melhores desempenhos térmicos em função de sua maior porosidade. Outro fator positivo da CzP-SF, é que por ser um material mais leve, quando usado em misturas cimentícias, diminui seu peso, diminuindo portanto o peso das estruturas em que este material for utilizado.

- **Dos métodos utilizados.**

Os métodos utilizados na pesquisa para avaliação dos materiais permitiram a verificação de parâmetros de comportamento hidrodinâmico importantes. No entanto, alguns deles, como os utilizados para determinar a absorção dos grãos da cinza pesada, precisam ser adequados aos materiais utilizados. O cálculo realizado para estimar a absorção dos grãos de cinza pesada foi limitado e subestima a absorção desse material. Para ser usado com mais acuracidade, um coeficiente que considere a diferença entre as formas dos grãos precisa ser considerado.

O método usado no ensaio de absorção capilar dos materiais granulares se mostrou eficiente para o propósito do ensaio. Entretanto, como os materiais granulares não têm uma forma definida, é preciso tomar cuidado no preenchimento do molde usado no ensaio, para que seu volume, considerado no cálculo das massas unitárias, corresponda aos valores reais. Falhas de preenchimento do molde, na ordem de 1 mm, já comprometem os resultados.

Para o ensaio de secagem ao ar, seria mais interessante que toda a mesma amostra do ensaio de absorção fosse utilizada, para evitar alterações na massa unitária e favorecer a análise dos dois ensaios.

A hipótese de que a resistência elétrica das argamassas diminui com o aumento do seu teor de umidade pôde ser comprovada, mas a medição dos perfis de umidade por medidas elétricas se mostrou limitada. O uso dos eletrodos dentro das amostras possibilitou que a presença de sais possivelmente alterasse os resultados. A presença de zonas diferentes de hidratação também pode ter favorecido essas alterações. Medições da resistência elétrica da água nos poros e da resistência elétrica da água na presença dos sais comumente encontrados nos materiais cimentícios, além da distribuição espacial das propriedades no material, no caso o grau de hidratação devem ser considerados.

## **5.2 Sugestões para pesquisas futuras.**

Como sugestões para continuidade da pesquisa, visando aprofundar o entendimento do comportamento hidrodinâmico dos materiais utilizados, propõem-se:

- A identificação da estrutura porosa dos materiais granulares e argamassas utilizadas, quanto à distribuição de tamanho de seus poros;
- Adequação dos métodos de absorção de água dos grãos para materiais muito porosos como a CzP, ou desenvolvimento de nova metodologia;
- Identificação das propriedades de fixação e transporte de umidade na fase vapor dos materiais estudados para avaliação de desempenho desses materiais em modelos de previsão de comportamento;
- Montagem da curva de calibração a partir do ganho de vapor de umidade;
- Identificação da difusividade da água nos poros e da resistência elétrica da água na presença dos sais comumente encontrados nos materiais cimentícios;
- Teste de outras metodologias para determinação dos perfis de umidade, usados no cálculo da difusividade hídrica.



## 6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.

AMYX, J.W., BASS JR., D.M., WHITING, R.L. Petroleum Reservoir Engineering. McGraw-Hill Book Co., New York. 1960.

ANDRADE, L. B. **Metodologia de avaliação para uso de cinzas pesadas de termoeletricas como agregado natural para o concreto**. Dissertação de mestrado (Pós Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004, 268p.

ANDRADE, L.B.; ROCHA, J.C.; CHERIAF, M. **Aspects of moisture kinetics of coal bottom ash in concrete**. Cement and Concrete Research, Volume 37, Issue 2, February 2007, p 231-241.

ÂNGULO, S. C.; JOHN; V. M.; ULSEN, C.; KAHN, H. **Caracterização de agregados de resíduos de Construção e demolição reciclados separados por Líquidos densos**. I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável, X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto- Especificação. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto- Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR-7214**: Areia normal para ensaio de cimento(produção). Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **NBR 7251**: Agregado em estado solto- Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778**: Argamassas e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005

\_\_\_\_\_. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos- Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 30**: Agregados miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

AZAR, J.H.; JAVAHERIAN, A.; PISHVAIE, M.R.; NABI-BIDHENDI, M. **An approach to defining tortuosity and cementation factor in carbonate reservoir rocks**. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2008, Pages 125–131.

BAIRAGI, N. K.; RAVANDE, K; PAREEK; V. K. **Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates.** Resources, Conservation and Recycling, Volume 9, Issues 1-2, August 1993, Pages 109-126.

BARBARE, N.; SHUKLA, A; BOSE,A. **Uptake and loss of water in a cenosphere–concrete composite material.** Cement and Concrete Research, Volume 33, Issue 10, October 2003, p 1681-1686.

BAVARESCO, C.R. **Utilização de entulho reciclado para produção de argamassas.** Dissertação de mestrado (Pós Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001. 125p.

BAZUCO, Régis Sandro. **Utilização de Agregados Reciclados de Concreto para Produção de novos concretos.** Dissertação de mestrado (Pós Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1999, 112p.

BUYLE-BODIN, F; HADJIEVA-ZAHARIEVA, R. **Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete.** Materials and Structures, Vol. 35, September-October 2002, pp 504-509.

CAPUTO, P.H. **Mecânica dos solos e suas aplicações - Fundamentos.** Volume 1. LTC editora, Rio de Janeiro. 1988

CHERIAF, Malik; ROCHA, Janaíde Cavalcante. **Caracterização dos resíduos industriais do estado de Santa Catarina e as possibilidades de valorização na construção civil.** Brasil - Porto Alegre, RS. 1997. p. 81-92. In: Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 1º, Canela, 1997. Artigo técnico.

COLEMAN, G.R. **The use of electrical moisture meters'.** Building Engineer, June 1997.

CORINALDESE, V.; MORICONE, G. **Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate.** Construction and building Materials. 2008.

CRAUSSE, P; LAURENT, J. P.; PERRIN, B. **Influence des phénomènes d'hystérésis sur les propriétés hydriques de matériaux poreux : Comparaison de deux modèles de simulation du comportement thermohydrigue de parois de bâtiment.** Porous materials hysteretic moisture characteristics : influence on water content distributions in buildings walls. Comparison of two simulation models. Revue Générale de Thermique, Volume 35, Issue 410, February 1996, p 95-106.

DAIAN, J. F.; LAURENT, J. P. **Structure poreuse et transport d'humidité dans les roches**”, Cours Européen Sciences et matériaux du patrimoine culturel, 1ère session, Ravello/Rome, 13-20 Avril 1993, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, 1996.

DE FREITAS, V. P.; ABRANTES, V.; CRAUSSE, P. **Moisture migration in building walls- analysis of the interface phenomena.** Building and Environment, volume 31, Nº 2, 1996, pag. 99-108.

DUCHESENE, J.; BERUBE, M.A.; **The effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR: another look at the reaction mechanism.** Part 2. Pore solution chemistry, Cement and Concrete Research. 24 (2) (1994) 221–230.

FERNANDES, C. P. **Estudo dos processos de condensação e migração de umidade em meios porosos consolidados: análise experimental de uma argamassa de cal e cimento.** Dissertação (Pós- graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 1990.

FLINT, L. E.; SELKER, J. S. **Use of porosity to estimate hydraulic properties of volcanic.** Advances in Water Resources 26 (2003) 561–571

FOLIENSTE, G.C.; LEICESTER, R.H.; PHAM, L. **Development of the CIB Proactive Program on Performance Based Building Codes and Standards.** CSIRO BCE Doc 98/232: *CIB Proactive Program*. CSIRO Building, Construction and Engineering. Austrália, 1998.

GARBOCZI, E.J.; **Permeability, diffusivity and microstructural parameters: a critical review.** Cement Concrete Research, 1990, 20 pp 591-601

HALL, C. **Barrier performance of concrete: A review of fluid transport theory.** Materials and Structures, 1994, Nº 27, p. 291-306.

OH, B. H.; JANG, S. Y. **Prediction of diffusivity of concrete based on simple analytic equations.** Cement and Concrete Research 34 (2004) 463–480.

JANZ, M. **Methods of measuring the moisture Diffusivity at high moisture levels.** Licentiate thesis. University Of Lund . Lund Institute Of Technology. Lund, 1997. 83p.

HANŽIĆ, L.; ILIĆ, R. **Relationship between liquid sorptivity and capillarity in concrete** .Cement and Concrete Research, Volume 33, Issue 9, September 2003, p 1385-1388.

R. KASEMCHASIRI, S. TANGTERMSIRIKUL. **A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete.** Construction and Building Materials 21 (2007) 1322–1334.

KHATIB, J. M. **Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate.** Cement and Concrete Research, Volume 35, Issue 4, April 2005, Pages 763-769

KOLIAS, S.; GEORGIU, C. **The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete,** Cement and Concrete Composites 27 (2005) 211–216.

KUMARAN, M. K. **Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts.** Final Report, Volume 3, Task 3: Material Properties, International Energy Agency Annex 24, Laboratorium Bouwfysica, K. U. -Leuven, Belgium. 1996.

LANDI, F.R. **Argamassas de assentamento e revestimento**. Escola Politécnica da USP/BNH – CEF. Relatório final, agosto 86 – Julho 87.

LAURENT J.P. **Capillary Water Transfer in Stone Materials: Theoretical and experimental aspects** in : Sciences and Technologies of the Materials and of the Environment for the Protection of Stained-Glasses and Stone Monuments, Advanced Study Course, Paris, 7-18 Sept. 1998, R.A. Lefèvre, Ed., European Commission, pp. 19-39, 2001, ISBN 92-894-0990-8.

LAURENT J.P. **Comportement hygrothermique des pierres de Rouffach et Rorschach**, 1er Colloque du programme Franco-Allemand de recherche pour la conservation des monuments historiques, Karlsruhe (RFA), 24-25 Mars 1993.

LAURENT, J.P. **Modelling water and heat transfers in stones under climatic influences : physical basis**, 8th Int. Congress on the Deterioration of stone, Berlin, 30/9-4/10 1996.

LAURENT J.P., BRÜGGERHOFF S., BASTIAN G., BRUNJAIL C., CHENE G., LEGRAND J., MALAURENT P., MORAT P., VOUVE J., WANGE G., **“Etude de l’effet des sollicitations microclimatiques sur le cycle de l’eau dans la pierre”**, Colloque final du Programme Franco-Allemand de recherche pour la conservation des monuments historiques, Strasbourg, 25-26 Février 1997, Exé Productions, Paris, ISBN 2-913993 01 X, 1999.

LENZI, J. E. **Influencia do uso de cinzas da combustão de carvão mineral em argamassas de revestimento**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

LEVY, Salomon M. **Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Concretos, produzidos com Resíduos de Concreto e Alvenaria**. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PCC.USP, São Paulo, 2001.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. Dissertação (mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

MARTYS,S.; FERRARIS,C.F.; C.F. **Capilarity Transport in mortar and concrete**. Cement and Concrete Research, 1997, vol. 27, p747-760.

MCCARTER, W.J. ; STARRS, G.; CHRISP., T.M. **Electrical conductivity, diffusion, and permeability of Portland cement-based mortars**. Cement and Concrete Research 30 (2000) 1395-1400.

MEROUANI, L. **Phénomènes de sorption et de transfert d’humidité dans des matériaux du bâtiment. Étude expérimentale comparative d’un mortier de ciment et d’un enduit de façade**. Thèse docteur 3° Cycle. Institut National Poytechnique de Grenoble, Novembro, 1987.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

NAMBIAR, E.K.K.; RAMAMURTHY, K. **Sorption characteristics of foam concrete**. Cement and Concrete Research, maio 2007.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução: salvador E. Giammusso. 2º ed. Ver. Atual. São Paulo: Pini, 1997.

PAES, I. N. L.; **Avaliação do Transporte de Água em Revestimentos de argamassa nos momentos Iniciais Pós-Aplicação**. Tese (Pós graduação em Estruturas e Construção civil) Universidade de Brasília. Brasília, 2004.

PAGE, C.L.; VENNESLAND; O. **Pore solution composition and chloride binding capacity of silica fume cement pastes**. Materials and Structures. 16 (91)(1983) 19– 25.

PHILIP, J. R. **The teory of infiltration: the infiltration equation and it´s solutions**. Commonwelath Scientific and Industrial Research Organization, Australia. 1958.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Solesward Consultoria e Vendas. Curitiba, 1996.

QUENARD, D; SALLEE, H. **Water vapour adsorption and transfer in cement-base materials: a network simulation**. Materials and structure, v.25, p. 515-522, 1992.

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M.; POZZOBON, C.; MAIA, M. S., MAGRI, L.; XAVIER, S.M.T. **Reaproveitamento das cinzas pesadas do Complexo Jorge Lacerda na elaboração de materiais de construção: aspectos tecnológicos e ambientais**. In: XV Seminário nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. **Anais...** Foz do Iguaçu, Paraná, 1999.

SANTOS, F. **Avaliação de propriedades higrotérmicas das argamassas : estudo de caso com as cinzas pesadas**. Dissertação (Pós- graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa catarina. Florianópolis, 2006.

SATO, M. N. **Análise da porosidade e das propriedades de transporte de massa de concretos com vistas à avaliação de suas durabilidades**. Tese (Pós – graduação em Engenharia Civil) Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

SHI, C. **Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results**. Cement and Concrete Research. 34 (2004) 537–545

STREETER, V.L. Editor chefe. **Handbook of fluid dynamics**. McGraw-Hill Book Company, Inc. 1961.

TUMIDAJSKI, P.J.; SCHUMACHER, AS.; PERRON, S.; GU, P.; BEAUDOIN, J.J. **On the relationship between porosity and electrical resistivity in cementitious systems**. Cement end Concrete Research, Vol. 26, No. 4, pp. 539-544, 1996.

VALEN, M. S. **Moisture transfer in organic coatings on porous materials- *The influence of varying environmental conditions***. Tese. Norwegian University of Science and Technology, NTNU. Trondheim, NORWAY, 1998.

WANG, Y. ; CHUNG, D.D.L. **Spatial distribution of mechanical and electrical properties of cement mortar prior to loading**. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 10, pp. 1373–1378, 1998.

WILSON, M.A.; TAYLOR, S.C. **The initial surface absorption test (ISAT): an analytical approach**. Magazine of Concrete Research, 1998. p179-185

WORMALD, R. AND BRITCH, A.L. **Methods of Measuring moisture Content Applicable to Building Materials**. Building Science, Vol. 3, pp.135-145. 1969.

ZAKRI, T.; LAURENT J.P. **On the use of Time Domain Reflectometry technics for water content measurement**, 14th ECTP, Lyon, 16-19 Sept.1996, Poster.